

Sensorização de uma Máquina de Corte por Laser

Tiago Filipe Gomes Bragança

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. Joaquim Gabriel Mendes

Coorientador: Prof. António Mendes Lopes



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Novembro 2013

À minha família e amigos

Resumo

A necessidade de garantir a segurança e fiabilidade nos processos industriais tem aumentado nos últimos anos, o que motiva muitas empresas a procurarem novas soluções de monitorização dos seus equipamentos.

Esta dissertação surgiu da relação entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a empresa ADIRA – Metal Forming Solutions SA, e visa a instrumentação de uma máquina de corte por Laser. Nesta dissertação foi estudada a sensorização do caminho ótico da máquina ADIRA LP3015.

A proposta de solução desenvolvida vai de encontro às crescentes necessidades dos mercados e promove a segurança de funcionamento e autodiagnóstico da máquina. Esta proposta surge de forma a colmatar a necessidade emergente de monitorização da máquina LP3015 no sentido de a tornar mais segura e inovadora num mercado cada vez mais competitivo.

Este projeto contempla a sensorização do caminho ótico, permitindo monitorizar as suas condições de funcionamento, nomeadamente:

- temperatura dos espelhos refletores;
- condições do ar no caminho ótico;
- deteção de obstrução e/ou fumo ao longo do caminho ótico.

Foram estudadas duas soluções, uma recorrendo a equipamento industrial e outra de baixo custo, usando componentes de laboratório. Devido a imposições orçamentais, foi implementada apenas a solução de baixo custo, permitindo a leitura das variáveis descritas recorrendo a um microcontrolador Arduíno. A disposição física dos sensores na máquina foi estudada recorrendo a desenho 2D e 3D reais. Foi ainda desenvolvida uma interface de leitura dos sensores, de modo a simular as funcionalidades a implementar na máquina. Esta interface foi inicialmente realizada num computador tendo sido posteriormente transferida para uma HMI industrial. Foram posteriormente realizados testes que visam a validação da proposta de sensorização.

A solução proposta e implementada em laboratório cumpre as funcionalidades pedidas, mas não garante a necessária robustez para a sua utilização em condições de funcionamento extremas inerentes ao meio industrial.

Instrumentation of a Laser cutting machine

Abstract

Nowadays the need for safe and automated industrial processes is increasing, which motivates many companies to look for new monitoring solutions for their technologies. This thesis emerged from the collaboration between Faculty of Engineering of the University of Porto and ADIRA – Metal Forming Solutions SA. The goal of this cooperation is the instrumentation of a laser cutting machine. During this dissertation a sensing solution for the optical path of an ADIRA LP3015 laser cutting machine was studied and developed.

The solution meets the rising requirements of current markets and promotes the machine improvement. Furthermore this proposal is a way to ensure the machine needs of emerging monitoring systems in order to make it safer and innovative to be competitive in the market.

This project includes the sensing system solution for the laser cutting machine optical path and allows monitoring all operation conditions, including:

- temperature of the mirrors;
- air conditions in the optical path;
- detection of obstruction or smoke along the optical path.

There were two proposals, an expensive solution and low budget solution. Due to economic limitations, only the low cost solution was implemented. Using appropriated sensors, a sensing system was developed in the lab (at a pilot scale) that successfully reads the parameters described above. A microcontroller embedded in an Arduino board was used for data acquisition. The sensors were tested to check their functionality and adequability. To ascertain their layout in the machine, real CAD 2D and 3D drawings were used. It was also established a sensor interface performed initially in a computer and later, using a RS-232 communication protocol, in an industrial HMI. Tests were performed to evaluate the proposed solutions.

The proposed solution (pilot scale) has the intention to be implemented in the future in ADIRA laser cutting machines. However the solution established should be improved in future works to ensure robustness and functionality in extreme operating conditions inherent to the industrial environment.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Joaquim Gabriel, e ao meu coorientador, professor António Mendes Lopes, pelo tempo despendido, pela ajuda e contribuição em todos os momentos da minha dissertação.

Gostaria de agradecer ao professor Francisco Freitas por todo o tempo disponibilizado no apoio aos projetos do ramo de Automação.

Agradeço aos assistentes técnicos Joaquim Silva e António Ramalho pelo apoio prestado e por todo o conhecimento transmitido ao longo da minha dissertação.

Gostaria de agradecer aos meus colegas e amigos que partilharam comigo o laboratório, pelas ideias, entreajudas e ainda pelos momentos lúdicos que deixarão certamente saudades deste período.

Deixo uma palavra de agradecimento à empresa ADIRA – Metal Forming Solutions SA pela oportunidade de desenvolver este trabalho com claro interesse industrial.

Gostaria ainda de agradecer à minha família e a todos os meus amigos pelo apoio incondicional ao longo de todo o curso.

Por último e não menos importante, gostaria de agradecer à Unidade de Derretidos, que me acompanhou ao longo do meu trajeto universitário.

Tiago Filipe Gomes Bragança

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Motivação.....	2
1.2	Objetivos	2
1.3	Trabalho desenvolvido	3
1.4	Organização da dissertação.....	3
2	Estudo da Máquina Laser	4
2.1	Estrutura e funcionamento	5
2.2	Espelhos	7
2.3	Caminho ótico	9
3	Limitações da Monitorização na Máquina.....	11
3.1	Temperatura dos espelhos.....	11
3.2	Monitorização das condições do ar.....	13
3.3	Deteção de fumo/barreira.....	14
4	Proposta de Solução.....	15
4.1	Pressupostos em que assenta a proposta de solução.....	15
4.2	Sensorização da temperatura	16
4.2.1	Análise do atravancamento e custos	17
4.3	Sensorização das condições do ar	17
4.4	Deteção de barreira/fumo.....	18
4.5	Proposta de solução <i>premium</i>	19
4.5.1	Aquisição de dados	19
4.5.2	Seleção do sensor de temperatura premium.....	19
4.5.3	Seleção do sensor premium de monitorização das condições do ar	20
4.5.4	Seleção do detetor de barreira/fumo premium.....	21
4.6	Proposta de solução <i>low cost</i>	21
4.6.1	Arduíno	22
4.6.2	Seleção do sensor de temperatura low cost.....	23
4.6.3	Seleção do sensor low cost de monitorização das condições do ar	27
4.6.4	Seleção do detetor de barreira/fumo low cost.....	29
5	Implementação da Proposta de Solução <i>Low Cost</i>	33
5.1	Implementação dos sensores	33
5.1.1	Sensor de temperatura	33
5.1.2	Sensor das condições do ar	35
5.1.3	Detetor de barreira/fumo.....	36
5.2	Interface de aquisição de dados	37
5.2.1	Interface física	37
5.2.2	Leitura das variáveis.....	40
5.3	Interface em HMI.....	41
5.3.1	Comunicação RS-232.....	41
5.3.2	Protótipo da Shield RS-232	43
5.3.3	Implementação da HMI Omron NQ3-MQ000-b	45
5.3.4	HMI National Instruments TPC-2006	46

6	Testes e Validação	48
6.1	Simulação térmica do espelho	48
6.2	Teste de alcance do detetor de barreira.....	51
6.3	Teste de deteção de fumo/barreira	52
6.3.1	Simulação da queda/desvio do fole	52
6.3.2	Simulação da queima do fole.....	52
6.3.3	Análise termográfica da queima do fole.....	54
6.3.4	Proposta de solução alternativa para deteção de fumo	56
7	Conclusões.....	58
8	Referências e Bibliografia	60
	ANEXOS.....	62
	ANEXO A: Placa de interface.....	63
	ANEXO B: Conversor TTL/RS-232.....	65
	ANEXO C: Conversor TTL/RS-232 com isolamento	67
	ANEXO D: Lista de componentes utilizados na <i>Shield</i> RS-232.....	69

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Máquina de corte por laser Adira.....	2
Figura 2.1 – Máquina de corte por laser Adira LP3015	4
Figura 2.2 – Perspetiva simplificada da máquina.....	5
Figura 2.3 – Estrutura da máquina de corte por laser.....	5
Figura 2.4 – Cabeça de focagem	6
Figura 2.5 – Espelho metálico da máquina laser	6
Figura 2.6 – Mesa de corte	7
Figura 2.7 – Espelho refletor	7
Figura 2.8 – Refletividade dos espelhos.....	8
Figura 2.9 – Espelho para potências até 3,5 kW	8
Figura 2.10 – Espelho para potências de 3,5 kW ou superiores.....	8
Figura 2.11 – Espelho e fole de proteção	9
Figura 2.12 – Bypass instalado por cima do fole para recirculação do ar.....	10
Figura 3.1 – Espelho "contaminado".....	12
Figura 3.2 – Espelho queimado	12
Figura 3.3 – Gráfico psicométrico.....	13
Figura 4.1 – Tipos e gamas de medição de temperaturas dos RTD	16
Figura 4.2 – Tipos e gamas de medição de temperaturas dos termopares.....	17
Figura 4.3 – Opacímetro ZELL	18
Figura 4.4 – Sensor de temperatura JUMO 90/0049506.....	19
Figura 4.5 – Sensor VAISALA DMT152	20
Figura 4.6 – Transmissor Carlo Gavazzi PA18CAT20NASA.....	21
Figura 4.7 – Arduíno Uno	22
Figura 4.8 – Sensor de temperatura Thermomart NTC10K-S.....	24
Figura 4.9 – Montagem do sensor de temperatura	25
Figura 4.10 – Termístor com casquilho.....	26
Figura 4.11 – Disposição do termístor em corte do Modelo 3D	26
Figura 4.12 – Sparkfun SHT15 Breakout.....	27
Figura 4.13 – Vista explodida da implementação do sensor SHT15.....	28
Figura 4.14 – Aspeto final da implementação do sensor SHT15	29
Figura 4.15 – Banner S186E (a) e Banner S18SP6R (b).....	29
Figura 4.16 – Montagem do detetor de barreira	30

Figura 4.17 – Alterações do fole	31
Figura 4.18 – Implementação do detetor no <i>bypass</i>	32
Figura 5.1 – Valores da aproximação da curva característica do termístor.....	33
Figura 5.2 – Aproximação da curva do termístor (temperatura versus resistência)	34
Figura 5.3 – Divisor de tensão.....	34
Figura 5.4 – Resultado do sensor de temperatura.....	35
Figura 5.5 – Resultado do Sensor das condições do ar	35
Figura 5.6 – Erro de temperatura do sensor SHT15 (°C)	36
Figura 5.7 – Erro de humidade relativa do sensor SHT15 (%)	36
Figura 5.8 – Redução de tensão com acoplador ótico	37
Figura 5.9 – Diagrama esquemático da placa de interface	38
Figura 5.10 – Aspeto final da placa de interface	38
Figura 5.11 – Montagem completa dos sensores.....	39
Figura 5.12 – Interface em <i>LabVIEW</i>	40
Figura 5.13 – Pormenor da leitura da temperatura de contacto (aquecimento do sensor)	41
Figura 5.14 – Circuito MAX232	42
Figura 5.15 - Esquemático da placa de conversão TTL/RS-232.....	42
Figura 5.16 – Placa de conversão TTL/RS-232	43
Figura 5.17 – Esquemático da <i>Shield</i> RS-232	44
Figura 5.18 – <i>Shield</i> RS-232	44
Figura 5.19 – Omron NQ3-MQ000-b	45
Figura 5.20 – Interface da HMI Omron	45
Figura 5.21 – HMI National Instruments TPC-2006.....	46
Figura 5.22 – Procedimento de implementação da HMI.....	47
Figura 6.1 – Convecção natural (ar)	49
Figura 6.2 – Resultados do modelo térmico	49
Figura 6.3 – Simulação térmica do permutador	50
Figura 6.4 – Diferença de temperatura no espelho.....	50
Figura 6.5 – Teste de alcance (1m)	51
Figura 6.6 – Montagem utilizada para o teste do fole	53
Figura 6.7 – Fumo gerado pela queima do fole.....	53
Figura 6.8 – Estrutura de teste para análise termográfica.....	54
Figura 6.9 – <i>Setup</i> utilizado.....	55
Figura 6.10 – Queima do fole (a); em perspectiva termográfica (b)	55

Figura 6.11 – Detetor durante a queima (a); em perspectiva termográfica (b)	56
Figura 6.12 – Esquema da caixa refletora	57

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Características do sensor de temperatura JUMO 90/00491506.....	19
Tabela 2 – Caraterísticas do sensor VAISALA DMT152.....	20
Tabela 3 – Caraterísticas do Sensor Carlo Gavazzi PA18CAT20NASA.....	21
Tabela 4 – Caraterísticas da comunicação.....	23
Tabela 5 – Caraterísticas do Sensor Sensirion SHT15	27
Tabela 6 – Componentes montados.....	39

1 Introdução

A tecnologia laser (acrónimo inglês de "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" - amplificação da luz pelo efeito da emissão estimulada da radiação) permite efetuar o corte de materiais, sem contacto, nem desgaste, gerando uma superfície com um bom acabamento [1]. Em certos casos, nomeadamente na medicina humana, o laser tem ainda a vantagem de permitir um corte estéril e a cicatrização imediata.

A luz laser é uma ferramenta bastante eficaz, permitindo uma total desintegração do material, quando bem manuseado. Dessa forma, e aliada a uma focagem precisa, é especialmente interessante em aplicações de corte de materiais, apresentando algumas vantagens em relação aos outros processos alternativos, nomeadamente o corte estreito de elevada qualidade sem necessidade de maquinagem posterior [2].

Atualmente existem vários tipos de laser, que podem ser qualificados de acordo com a frequência da radiação utilizada (ultravioleta, visível e infravermelho). Podem ainda ser qualificados em função da sua génese, como por exemplo lasers gasosos (lasers de CO₂ e Hélio-Néon, etc.) e lasers de estado-sólido (laser YAG, etc.) [3].

As potências dos lasers vão desde alguns mW (usados no corte de têxteis) a dezenas de kW (usados por exemplo no corte de chapas de navios) [4].

O processo de corte por laser é largamente utilizado, constituindo aproximadamente 25% de todas as aplicações de laser industriais. No ano de 2008 o processo de corte por laser rentabilizou mundialmente um total de 6 biliões de US Dólares [3], sendo usado numa infinidade de aplicações [1, 4]:

- blindagens;
- ferramentas e componentes para máquinas;
- indústria automóvel e naval;
- indústria aeronáutica;
- vestuário;
- equipamento médico e hospitalar.

A empresa ADIRA – Metal Forming Solutions SA é um fabricante de equipamentos para trabalho em chapa, incluindo o corte, embutidura e quinagem.

Um exemplo de uma máquina de corte por laser fabricada por esta empresa encontra-se representado na Figura 1.1. Estas máquinas destinam-se a aplicações industriais de corte de chapas metálicas com espessuras até 20 mm, com potências entre 2,5 e 3,5 kW [5].



Figura 1.1 – Máquina de corte por laser Adira

1.1 Motivação

A empresa ADIRA – Metal Forming Solutions SA diagnosticou alguns problemas associados à falta de monitorização das suas máquinas de corte por laser. Nesse sentido, e aproveitando a relação privilegiada que a ADIRA mantém com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, foi proposta esta dissertação. A dissertação foi essencialmente motivada pela necessidade de colmatar algumas limitações verificadas nas máquinas de corte por laser. Esta dissertação visa a implementação de um sistema de sensorização ao longo do caminho ótico da máquina de corte por laser.

O sistema a implementar será um reforço aos dispositivos de segurança já existentes nas máquinas da empresa, permitindo assim monitorizar as condições em que ocorre o processo.

A tecnologia laser e a possibilidade de realização da dissertação em ambiente industrial foram fatores determinantes na minha decisão de escolha deste tema de dissertação.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo fundamental o desenvolvimento de um sistema de sensorização para a máquina LP3015 da ADIRA – Metal Forming Solutions SA, dando resposta aos eventuais problemas da máquina. Em concreto, este sistema visa a monitorização das condições do caminho ótico, de modo a aferir se estão reunidas as condições necessárias para transmissão do feixe laser. É pretendido um acréscimo de segurança da máquina de forma a prevenir a destruição do equipamento, nomeadamente dos espelhos e foles de proteção do caminho ótico.

Este sistema deverá ser suficientemente flexível de modo a ser igualmente aplicável aos modelos mais antigos comercializados pela ADIRA.

A solução proposta deverá contemplar dispositivos que permitam a monitorização dos seguintes parâmetros:

- temperatura, humidade e/ou temperatura do ponto de orvalho ao longo do caminho ótico;
- temperatura nos espelhos;
- deteção de alguma barreira física, impureza ou fumo ao longo do caminho ótico.

De modo a atingir os objetivos propostos, foi elaborado um estudo da máquina e das suas condições de funcionamento.

1.3 Trabalho desenvolvido

Ao longo desta dissertação foi estudada a tecnologia de corte por laser e o caminho ótico da máquina, de onde foram tiradas algumas conclusões em relação às limitações da máquina.

De forma a dar resposta às exigências crescentes de segurança foi implementado um sistema que consiste num:

- microcontrolador e dois sensores – que permitem a monitorização da temperatura, humidade e temperatura do ponto de orvalho ao longo do caminho ótico e temperatura nos espelhos;
- detetor do tipo barreira – com capacidade de deteção de barreiras físicas assim como deteção de fumo ao longo do caminho ótico.

Os parâmetros dos sensores utilizados foram estudados e otimizados de forma a tirar o melhor partido das suas potencialidades. Foram ainda efetuados testes e simulações com vista a verificar o comportamento dos sensores sob as condições de funcionamento e de alarme.

A disposição física dos sensores na máquina foi avaliada e foram propostas várias soluções de aplicação representadas em CAD 2D/3D.

Na implementação da sensorização em ambiente laboratorial foi criada uma interface do microcontrolador usando um HMI industrial.

1.4 Organização da dissertação

Os restantes capítulos da dissertação estão organizados da seguinte forma. No **capítulo 2** será feita uma pequena introdução à máquina em estudo, onde será descrito de forma sucinta o seu funcionamento e mecanismos que possam ser relevantes para a realização da presente dissertação. No **capítulo 3** serão descritos os problemas verificados na máquina.

No **capítulo 4**, será descrita a proposta de solução idealizada para colmatar os problemas encontrados anteriormente. Posteriormente, no **capítulo 5** será descrito o processo de implementação e otimização da proposta de solução encontrada no capítulo anterior. O **capítulo 6** contempla os testes realizados e a validação da sensorização implementada.

Por último, o **capítulo 7** aborda as conclusões do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

2 Estudo da Máquina Laser

No presente capítulo será explorada em detalhe a máquina Adira LP3015, de corte de laser, a qual é possível visualizar na Figura 2.1:



Figura 2.1 – Máquina de corte por laser Adira LP3015

Pela designação da máquina é possível constatar que se trata de uma máquina de corte por laser da gama *Premium* (LP) cuja mesa de trabalho tem as dimensões 3 x 1,5 m (3015). Os componentes da gama *Premium* são conhecidos por apresentarem qualidade construtiva superior às restantes gamas de produtos comercializadas pela empresa [5].

O laser utilizado nesta máquina é de CO₂ e é do tipo SLAB (laser de elevada potência, gerado entre dois elétrodos metálicos retangulares), que apresenta uma boa eficiência energética [6, 7]. Permite o corte de chapas de aço ao carbono de espessura até 20 mm com uma boa qualidade. A potência do laser é de 2,5 kW a 3,5kW, sendo considerado um laser de elevado desempenho e potência [5, 6]. Este tipo de laser não requer elevada manutenção quando comparado com outros tipos de laser [4, 5].

2.1 Estrutura e funcionamento

A máquina é composta por vários componentes principais e vários sistemas auxiliares (ver Figura 2.2 e Figura 2.3).

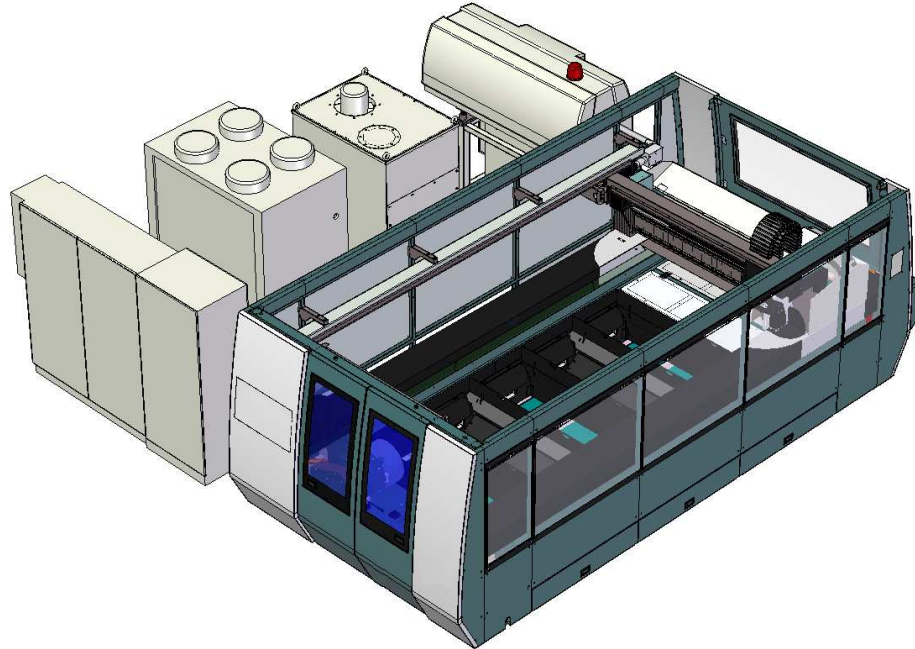


Figura 2.2 – Perspectiva simplificada da máquina

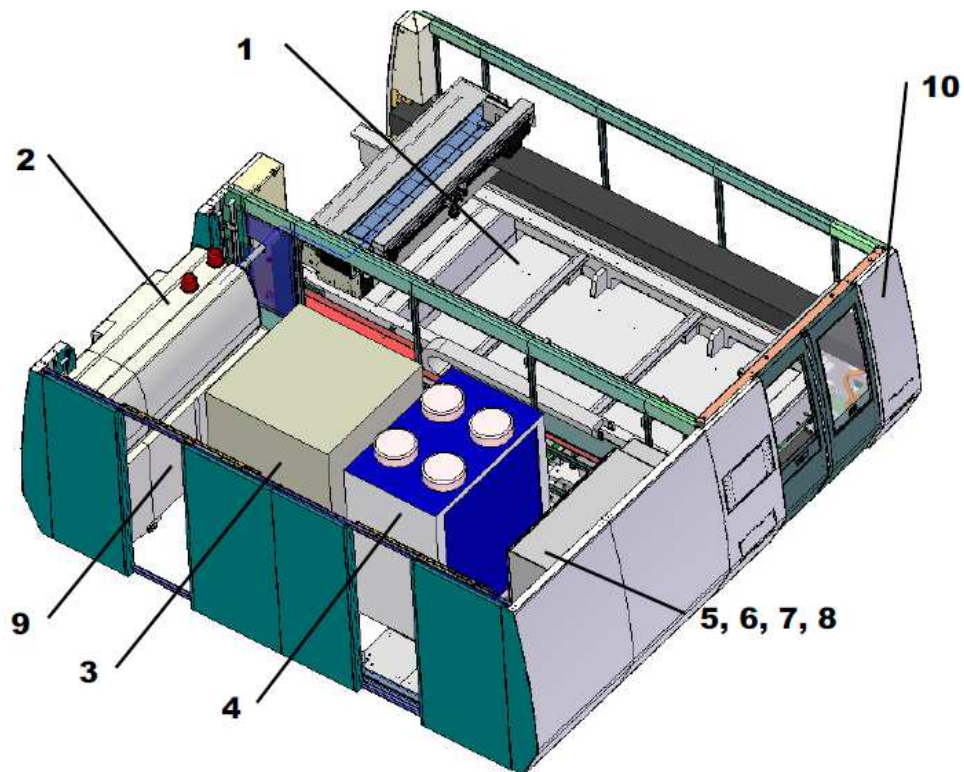


Figura 2.3 – Estrutura da máquina de corte por laser - Sistema de posicionamento (1), Fonte laser (2), Sistema de Aspiração de Fumos (3), Sistema de refrigeração (4), Sistema de ar comprimido (5), Sistema de Lubrificação (6), Sistema Elétrico de Potência e Comando (7 e 8), Sistema Elétrico da Fonte laser (9) Blindagens Exteriores (10) [5]

O laser é encaminhado desde a fonte laser até à cabeça de focagem da máquina (ver Figura 2.4), que se encontra sobre a mesa de trabalho, apontado numa direção perpendicular à mesa.



Figura 2.4 – Cabeça de focagem

O caminho que o laser percorre desde a fonte até à cabeça de focagem designa-se por caminho ótico. Esse caminho poderá ser essencialmente de dois tipos: um percurso realizado dentro de um fole, orientado através de refletores, ou alternativamente, a luz pode ser conduzida por uma fibra ótica [5]. Na máquina em estudo verifica-se o primeiro caso. O laser é conduzido por meio de sucessivas reflexões efetuadas por espelhos metálicos. Na Figura 2.5 é possível visualizar a estrutura de um dos referidos espelhos.

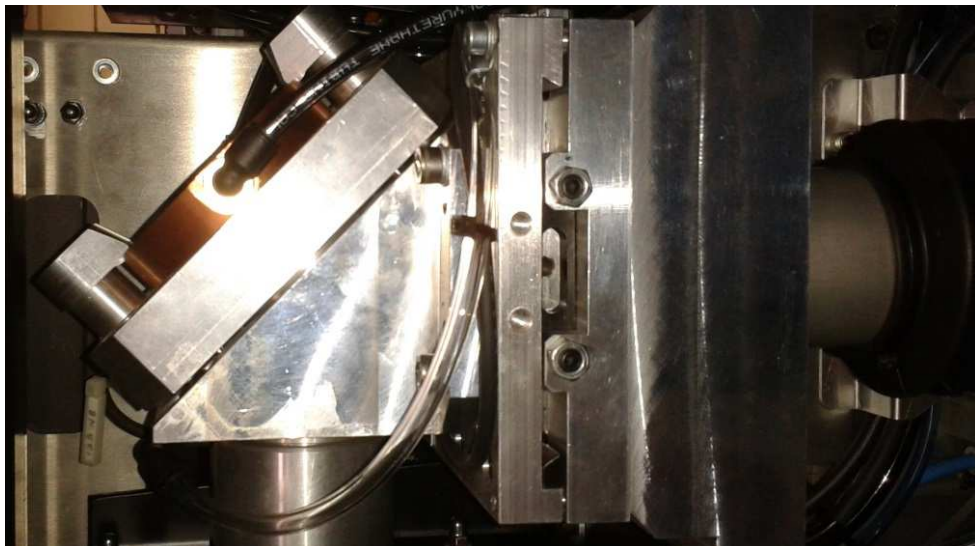


Figura 2.5 – Espelho metálico da máquina laser

A movimentação da cabeça da máquina é garantida por três motores lineares de velocidade relativamente elevada, tipicamente de 200 m/min, que permitem acelerações na ordem dos 2g. O movimento gerado pelos motores faz variar a distância entre espelhos, e dessa forma permite ajustar a posição da cabeça nos 3 eixos [5]. A orientação dos espelhos é fixa, sendo apenas ajustada durante o processo de calibração. Este processo é realizado antes da utilização da máquina ou quando surge alguma anomalia. Durante a operação de corte a mesa mantém-se fixa, podendo deslocar-se no final de cada operação para a substituição da chapa a cortar (ver Figura 2.6).



Figura 2.6 – Mesa de corte

2.2 Espelhos

Os espelhos são parte integrante do caminho ótico, e são os componentes responsáveis pela reflexão do feixe laser, desde a fonte laser até à cabeça de focagem.

Os espelhos (ver Figura 2.7) podem ser de diferentes materiais, contudo a empresa utiliza preferencialmente espelhos de ligas de cobre (AOI S-Pol) [8].



Figura 2.7 – Espelho refletor

Os espelhos são tratados superficialmente de modo a garantir uma taxa de refletividade superior a 99,4% (ver Figura 2.8) [8].

	Uncoated Metal			Silver Based		Gold Based					Maximum Metal Reflector			Phase Retarding			Polarization Control		
	Al	Cu	Mo	PS	ES	BG	PG	EG	PEG	SEG	MMR	MMR-A	DEMMR	TRZ	$\lambda/4$ RPR*	$\lambda/4$ HRPR*	ATFR	PLM	PLM-W
%R @ 0° AOI @ 10.6 μ m	98.3	99.2	98.0	99.1	99.6	99.0	98.8	99.5	99.4	99.6	99.8	99.8	99.8	+	+	+	+	+	+
%R @ 45° AOI S-Pol @ 10.6 μ m	98.7	99.4	98.8	99.4	99.7	99.4	99.3	99.7	99.6	99.8	99.9	99.8	99.8	+	+	+	≥ 99.0	≥ 99.5	≥ 99.8

Figura 2.8 – Refletividade dos espelhos [8]

Este tratamento é essencial para aumentar a eficiência do processo e reduzir o aquecimento dos espelhos. A restante energia proveniente do laser é absorvida. A absorção da energia é feita sobretudo sob forma de energia térmica, provocando o aquecimento dos espelhos [9]. Para limitar esse aquecimento, os espelhos possuem um sistema de arrefecimento a água. Este sistema de arrefecimento atua em malha aberta, não existindo feedback da temperatura a que se encontra o espelho [5].

O sistema de arrefecimento é ajustado para a potência do laser em uso. Os Lasers menos energéticos, tipicamente 2,5 kW, utilizam um permutador de calor, na forma de disco, onde internamente circula água fria, Figura 2.9. O arrefecimento é realizado pelo contacto do espelho com o permutador, dissipando calor por condução. Os sistemas de arrefecimento das máquinas com laser de potências de 3,5 kW, ou superiores, são constituídos por vários tubos de água que passam diretamente no interior do espelho, arrefecendo-o, Figura 2.10 [5].



Figura 2.9 – Espelho para potências até 3,5 kW



Figura 2.10 – Espelho para potências de 3,5 kW ou superiores

Os espelhos têm um sistema de vedação estático que reduz consideravelmente a entrada de impurezas para o interior do caminho ótico.

De modo a evitar o alojamento de impurezas na face refletora do espelho, existe ainda um sopro de ar que permitir limpar as impurezas superficiais e acelerar a transferência de calor para a envolvente por convecção forçada [5].

2.3 Caminho ótico

O caminho ótico da LP3015 é constituído por três espelhos e quatro caminhos, sendo três desses caminhos de distância variável. O laser é refletido de espelho em espelho até chegar à cabeça de focagem. A variação das distâncias entre cada espelho permite à cabeça de focagem cobrir toda a mesa de trabalho.

Os foles são elementos de dimensão variável que têm como objetivo a proteção do caminho percorrido pelo laser, de modo a garantir um correto funcionamento da máquina. Eles asseguram que não ocorre nenhum tipo de interferência no laser enquanto é refletido ao longo dos espelhos. Os foles são de um material sintético, constituído por fibras de *Aramid*, designado comercialmente por *Nomex* [10]. O ar que circula dentro do fole é pressurizado e a temperatura e humidade são mantidas constantes por um *Chiller* [11]. A sobrepressão de 0,5 bar permite não só um controlo de fugas, como também evitar a entrada de impurezas para o interior do caminho ótico. Na Figura 2.11 é possível verificar a disposição do fole ao longo do caminho ótico.

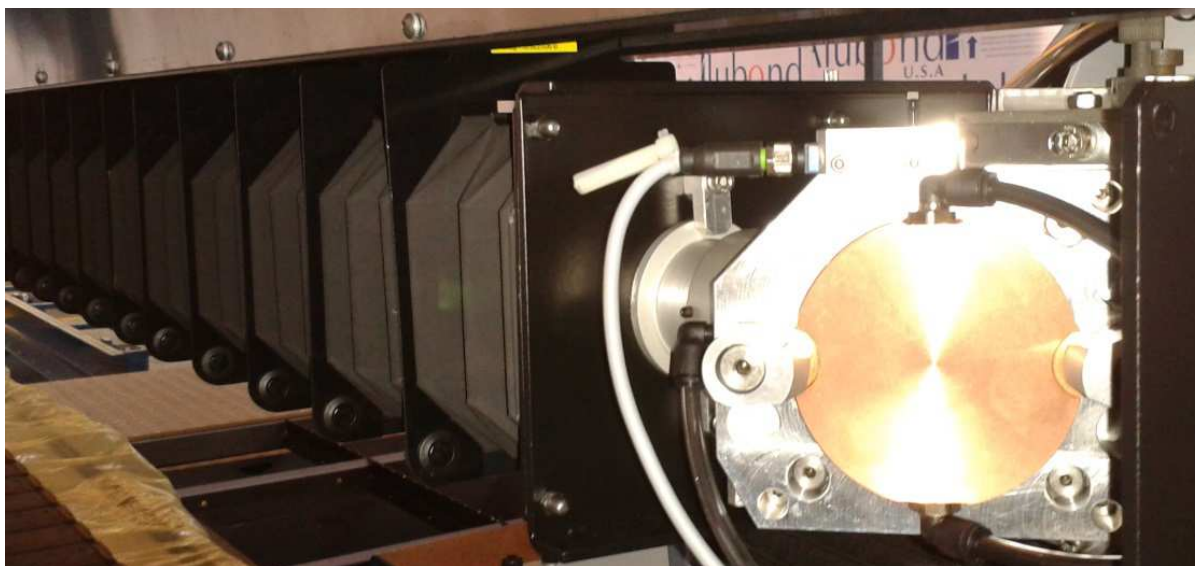


Figura 2.11 – Espelho e fole de proteção

O fole, para além de estanque, apresenta propriedades relevantes no que toca ao comportamento à chama. Tem um comportamento auto extingüível, pelo que no caso de ser atravessado pelo feixe laser o risco de incêndio é diminuto. Contudo na presença de fogo, o fole desintegra gradualmente e gera muito fumo [10]. Este fator poderá ser interessante na deteção da deflagração de um incêndio.

Quando ocorre um movimento do bloco que contém o espelho, dá-se uma compressão do ar de um dos foles e uma expansão no ar do fole oposto. Uma vez que a aceleração pode atingir valores de 2g, existe a necessidade de transferir o ar de um fole para o outro, de modo a manter a pressão constante e igual nos dois foles [5]. Para o efeito existe um canal de comunicação entre os dois foles, comumente designado por *bypass*. É neste canal que o ar pressurizado circula livremente entre os dois foles. O *bypass* fica situado acima dos foles, dentro de uma estrutura metálica, visível na Figura 2.12.

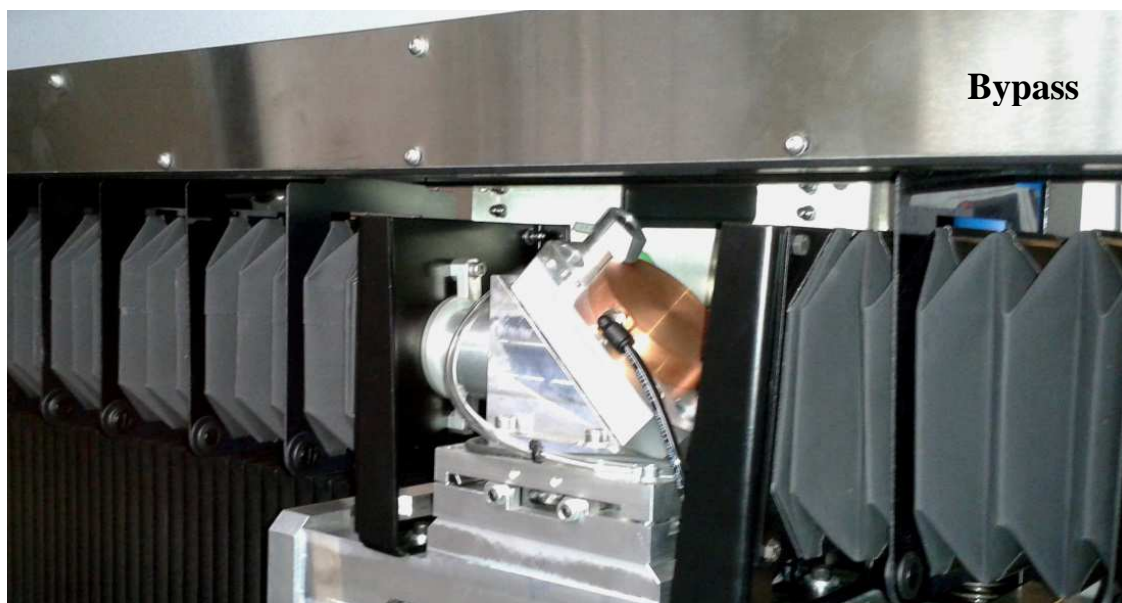


Figura 2.12 – Bypass instalado por cima do fole para recirculação do ar

Este canal poderá ter algum interesse na implementação da sensorização do ar interior.

3 Limitações da Monitorização na Máquina

As limitações encontradas na máquina, de uma forma muito objetiva, surgem na transmissão do feixe laser ao longo do caminho ótico. Essencialmente, o problema não está na funcionalidade da máquina, mas na ausência de monitorização. Em nenhum momento é possível averiguar se o caminho ótico se encontra dentro das condições ideais de funcionamento, facto que poderá levar a avarias e falhas graves.

Existem, de uma forma sucinta, três grandes preocupações associadas à falta de monitorização do caminho ótico:

1. falta de informação sobre a **temperatura** a que se encontram os espelhos refletores;
2. as **condições do ar (temperatura, humidade e/ou temperatura do ponto de orvalho)** dentro do caminho ótico são desconhecidas. Eventualmente a monitorização apenas da temperatura do ponto de orvalho será suficiente;
3. em caso de avaria ou quebra/incêndio de alguma parte do caminho ótico, não há nenhum dispositivo que permita a **deteção de fumo ou barreira física**.

As preocupações relativas à temperatura dos espelhos, monitorização das condições do ar e deteção de fumo/barreira física serão exploradas nas secções seguintes, 3.1, 3.2 e 3.3, respetivamente.

3.1 Temperatura dos espelhos

A temperatura dos espelhos é uma variável muito importante a medir, uma vez que indicia se a reflexão está a ocorrer à taxa pretendida. Apesar da existência do sopro de ar, é frequente que algumas impurezas e sujidades fiquem alojadas na superfície do espelho. Estas são prejudiciais já que reduzem a taxa de refletividade e podem alterar a trajetória da reflexão.

É frequente que uma vez alojada alguma sujidade, o espelho fique “contaminado” (ver Figura 3.1), perdendo as suas propriedades relevantes para a aplicação.



Figura 3.1 – Espelho "contaminado"

O aumento da taxa de absorção da energia proveniente do laser aquece o espelho, o que pode conduzir a dilatações, deformações e queima do próprio espelho. Na Figura 3.2 é possível ver o estado de um espelho que sobreaqueceu devido a impurezas situadas na sua face refletora.

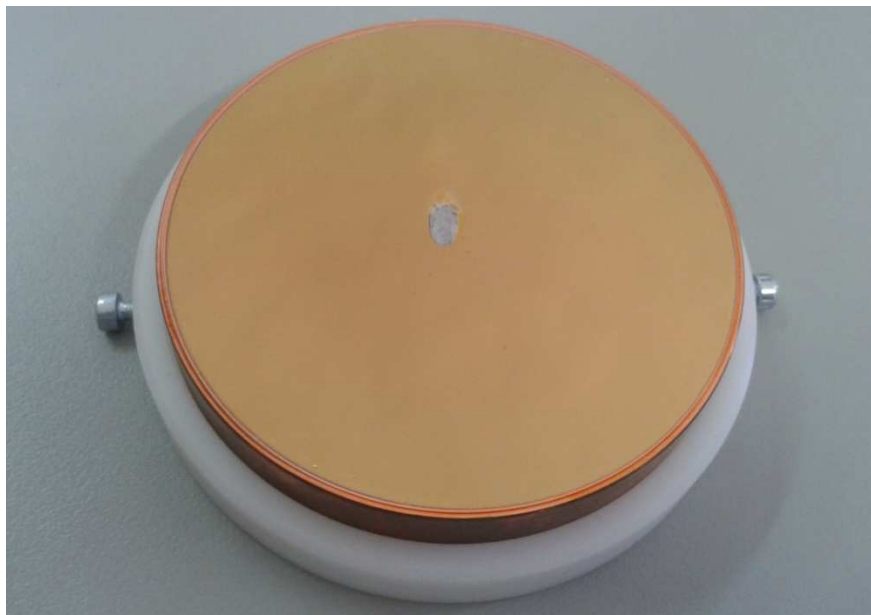


Figura 3.2 – Espelho queimado

Estes problemas levam a um mau funcionamento da máquina, uma vez que a focagem não é correta. Em caso extremo, poderá mesmo ocorrer uma degradação do espelho ou uma reflexão desalinhada [12]. Neste tipo de situações é possível que o desalinhamento provoque a degradação de outros componentes da máquina, nomeadamente do fole.

Para colmatar esse problema seria interessante conseguir determinar a temperatura do espelho, ou pelo menos garantir que a temperatura do espelho se encontra dentro de determinados limites. Uma subida brusca de temperatura poderá indiciar uma taxa de absorção superior à desejável.

O sensor de temperatura deverá ser capaz de ler de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, uma vez que a máquina irá operar dentro dessa gama, sendo desejável que apresente uma resposta rápida de modo a detetar as variações antes que ocorram danos graves no espelho.

3.2 Monitorização das condições do ar

A monitorização das condições do ar é muito importante de modo a aferir se estão garantidas as condições ideais de transmissão do laser até à sua focagem. A determinação e limitação da gama de temperatura e humidade relativa do ar são essenciais para garantir um bom funcionamento da máquina.

Caso o ar dentro do caminho ótico não se encontre devidamente condicionado, poderão surgir problemas como deformações térmicas e/ou degradação de componentes. Desta forma a temperatura do ar interior dos foles não deve ultrapassar os $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, de modo a não comprometer a funcionalidade e integridade de nenhum dos componentes do caminho ótico.

A humidade relativa, à semelhança da temperatura, também deverá ser monitorizada dado que poderão ocorrer problemas como a refração do feixe laser associada a uma elevada presença de partículas de vapor de água no ar. A refração do feixe laser poderá reduzir a eficiência da máquina uma vez que a focagem ocorre de forma deficiente e, na pior das situações, pode mesmo danificar componentes da máquina.

A temperatura de ponto de orvalho é a temperatura à qual o vapor de água presente no ar condensa. O cálculo da temperatura de ponto de orvalho tem um particular interesse nesta aplicação, na medida em que permite expressar a humidade relativa [13]. Existem gráficos, designados psicométricos, que relacionam a temperatura de ponto de orvalho com a temperatura e a humidade relativa, Figura 3.3.

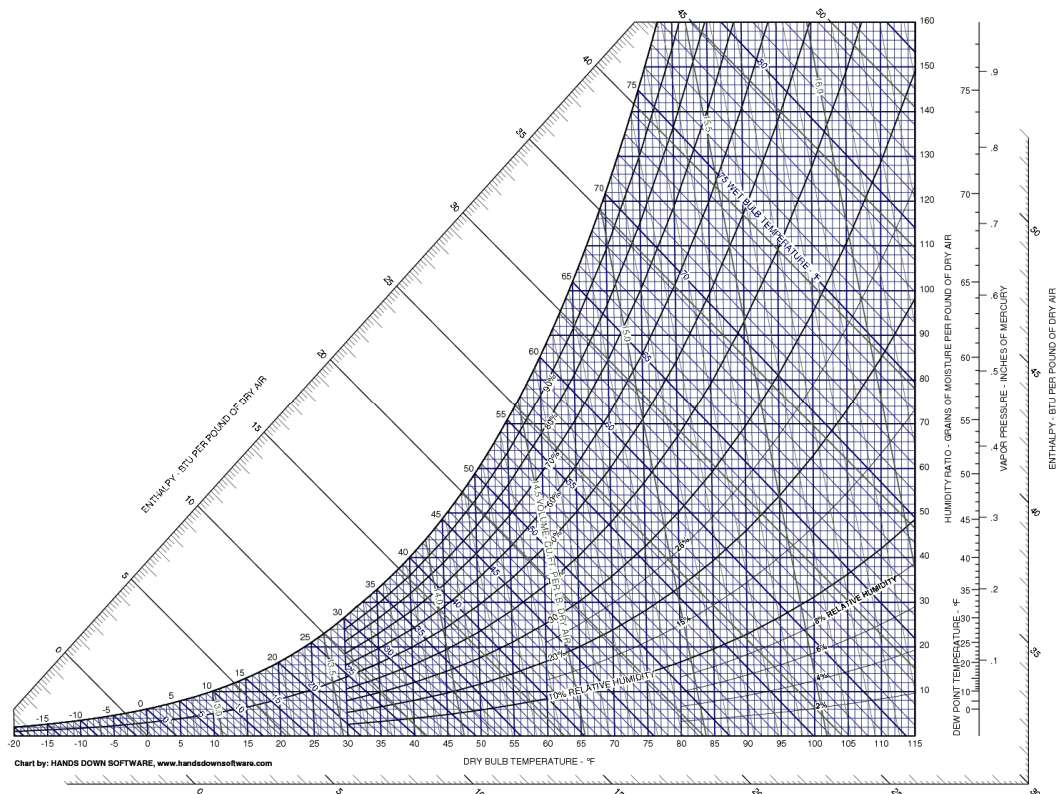


Figura 3.3 – Gráfico psicométrico [14]

Para a aplicação em estudo, será interessante proceder à leitura da temperatura do ponto de orvalho, ou analogamente aferir a temperatura e humidade relativa e proceder ao cálculo da temperatura de ponto de orvalho. Neste contexto será essencial garantir a leitura das variáveis através da sensorização apropriada. É relevante ler a temperatura, que deve estar compreendida entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, e ler a humidade relativa dentro de toda a sua gama (0 a 100%), contudo com especial relevância para baixos valores.

Dessa forma será possível determinar a temperatura de ponto de orvalho na gama pretendida (desde $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) através da medição da temperatura e da humidade relativa.

3.3 Detecção de fumo/barreira

A ausência de um elemento que permita a deteção de fumo e de obstruções no caminho ótico é um problema de grande relevância. A máquina opera tipicamente sem supervisão, e nesse sentido, seria interessante eliminar esta limitação de modo a aumentar a segurança de operação.

Inevitavelmente a ausência de monitorização, quer humana quer por via de sensorização, não permite detetar atempadamente alguns eventuais problemas, nomeadamente:

- **queda/desvio do fole:** é possível que durante a movimentação a alta velocidade os suportes do fole se degradem ou quebrem, deixando o fole cair interceptando o feixe laser. Esse problema gerará um incêndio e a degradação do fole e de outros componentes envolvidos, causando a imobilização da máquina;
- **presença de fumo no caminho ótico:** caso algum componente incendeie, este não é atualmente detetado, pelo que a máquina continua a operar;
- **interferência no caminho ótico de algum fator externo:** considerando a possibilidade de algum componente se degradar e cair sobre o caminho ótico, não existe nenhum dispositivo que permita a deteção da falha, pelo que a máquina continua a operar nessas condições, degradando o fole e os componentes.

4 Proposta de Solução

Ao longo do capítulo 4 serão apresentados os pressupostos em que assentaram as propostas de solução de monitorização da máquina de corte por laser (secção 4.1). Ainda neste capítulo é descrita detalhadamente a proposta de solução elaborada.

4.1 Pressupostos em que assenta a proposta de solução

De modo a colmatar as limitações encontradas na máquina e descritas no capítulo 3, foi criada uma proposta de solução que contempla fundamentalmente:

- **sensor de temperatura:** com o objetivo de medir a temperatura do espelho;
- **sensor de temperatura, humidade relativa e/ou temperatura do ponto de orvalho:** para monitorizar as condições do ar no caminho ótico;
- **detetor de barreira/fumo:** com o objetivo de detetar incêndios no fole.

Para além dos referidos sensores, será necessário um microcontrolador/autómato, que será utilizado para adquirir e processar os dados provenientes dos diferentes sensores e detetor, de modo a gerar alarmes e, em casos mais graves, desligar a máquina.

A estratégia utilizada para a abordagem dos problemas foi a criação de uma solução que cumpra todos os pressupostos inicialmente estabelecidos pela empresa para esta aplicação, que são os seguintes:

- **retrofitável** – permitir a inclusão da solução criada em modelos de máquinas de corte por laser já descontinuados, modernizando assim estes equipamentos;
- **modular** – a implementação da solução proposta deverá ser personalizável no momento da aquisição de uma máquina de corte por laser;
- **conservar a estrutura da máquina** – manter intacta a estrutura da máquina e realizar pontuais alterações apenas em alguns componentes;
- **reduzida cablagem** – evitar a utilização excessiva de cabos;
- **robusta** – deverá garantir o funcionamento sob condições industriais.

A proposta de solução deverá contemplar um único espelho, e posteriormente o sistema criado deverá ser replicado e implementada nos 3 espelhos presentes no caminho ótico.

4.2 Sensorização da temperatura

Descritos anteriormente os requisitos dos sensores, será agora necessário seleccionar o tipo de sensor mais adequado. De uma forma genérica, existem 4 tipos de sensores de temperatura que poderão ser utilizados nesta aplicação [15]:

- **RTD (*Resistive Temperature Detetor*)**;
- **termopar**;
- **termístor**;
- **pirómetro**.

Os RTD de platina apresentam boa linearidade em toda a gama de temperatura que se pretende analisar (Figura 4.1) [16].

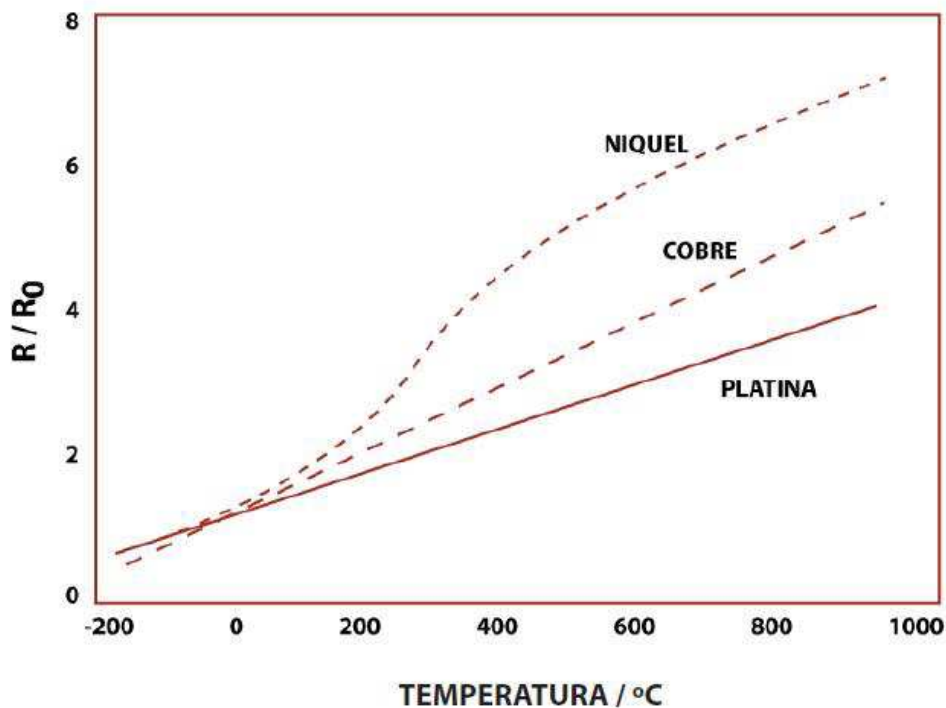


Figura 4.1 – Tipos e gamas de medição de temperaturas dos RTD [16]

Os RTD apresentam uma dinâmica aceitável, dependente da bainha de proteção.

O recurso a um termopar poderá ser viável devido ao seu reduzido tamanho, baixo custo e facilidade de aquisição no mercado, contudo apresenta uma gama de leitura demasiado grande para a aplicação em causa, podendo comprometer a resolução na leitura da temperatura (Figura 4.2) [15, 16]. Se apresentar uma junta exposta, o tempo de resposta pode ser muito curto, o que é uma vantagem adicional. No entanto, a necessidade de compensação eletrónica da junta fria poderá acarretar alguns custos adicionais. Para além disso, um termopar industrial robusto tem um preço elevado.

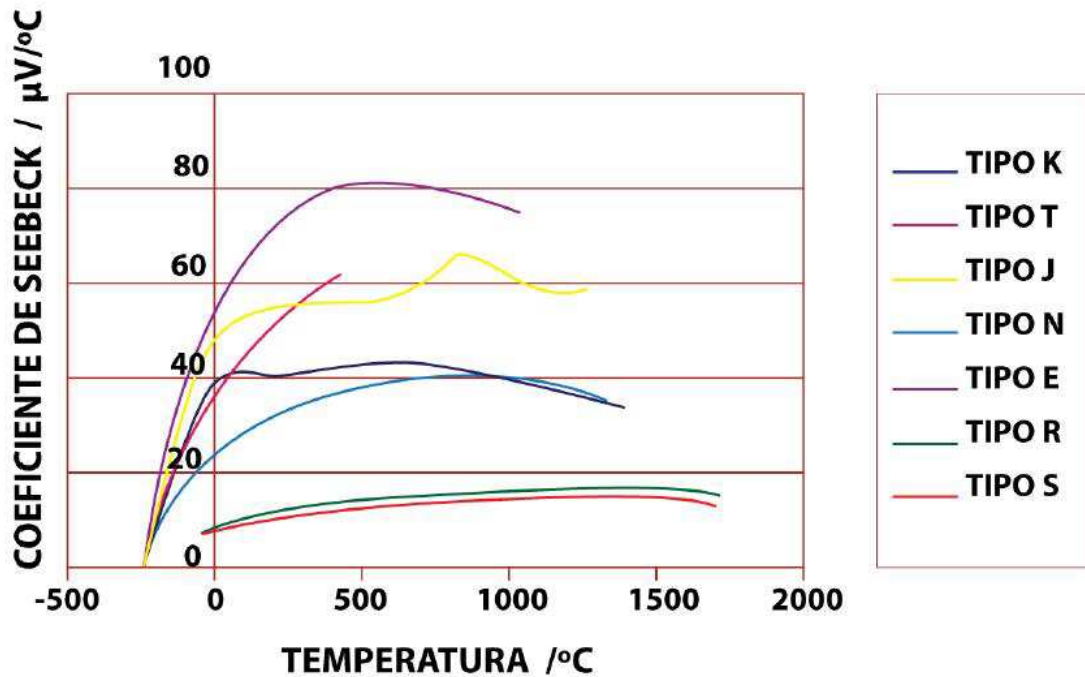


Figura 4.2 – Tipos e gamas de medição de temperaturas dos termopares [16]

O termistor apresenta uma resistência elétrica que varia com a temperatura de uma forma não linear e com elevada sensibilidade [15].

A utilização de um pirômetro foi descartada, uma vez que utiliza a leitura de radiação IV para a medição de temperatura, o que poderia levar a interferências com os feixes ópticos do laser. Para além disso uma leitura ótica poderá estar comprometida por poeiras e outros fatores externos (fumo, humidade, condensação, etc.).

Assim, qualquer um dos sensores poderá ser utilizado, contudo o termistor, devido à sua elevada sensibilidade, baixo custo e simplicidade no condicionamento de sinal apresenta-se como a mais interessante. O problema da não linearidade do sensor pode ser resolvido por software através da sua característica.

4.2.1 Análise do atravancamento e custos

O atravancamento é sem dúvida importante neste projeto, mas existem soluções compactas para cada um dos tipos de sensores vistos anteriormente. O preço, de uma maneira geral, não varia muito entre os diferentes tipos de sensores de temperatura, mas sim com a resolução e erro associado a cada um deles.

4.3 Sensorização das condições do ar

Como descrito anteriormente, existe a necessidade de monitorizar as condições do ar dentro do caminho ótico, garantido que a máquina só entrará em funcionamento se o ar se encontrar nas condições ideais de funcionamento.

No que toca à leitura das condições do ar, a melhor solução seria incluir apenas um sensor capaz de realizar a leitura da temperatura e humidade relativa e/ou temperatura do ponto de orvalho. As vantagens da utilização de apenas um sensor seriam o espaço ocupado, a redução de cablagem e a necessidade de apenas executar um orifício no caminho ótico.

O sensor a utilizar deverá estar situado ao longo do caminho ótico, de modo a determinar as condições do ar que nele circula.

4.4 Detecção de barreira/fumo

Como descrito anteriormente, ao longo do capítulo 3 será necessário recorrer a um detetor de barreiras/fumo para ter feedback de interferências de fumo ou barreiras que surjam no caminho ótico.

Existem algumas condicionantes associadas à escolha do detetor a utilizar, nomeadamente:

- este detetor não pode operar no espectro de emissão visível e ultravioleta, sob pena de detetar o feixe laser ou luz exterior;
- deve ter dimensões muito pequenas, uma vez que deve ser colocado nas extremidades do caminho ótico, onde há pouco espaço disponível.

Em primeira instância foi pensada a possibilidade de implementação de um opacimetro (Figura 4.3), um dispositivo concebido para deteção de fumo em condutas. Contudo, devido às elevadas dimensões e elevada inércia, essa hipótese foi afastada.



Figura 4.3 – Opacimetro ZELL

A segunda hipótese estudada foi a implementação de um sensor ótico, constituído por um emissor e recetor com saída analógica proporcional. Esta proposta seria interessante porque uma vez caracterizada a receção de luz em função da distância entre emissor e recetor, seria possível detetar pequenas variações, hipoteticamente associadas a impurezas e fumo. Contudo, este tipo de dispositivos tem um preço inoportável face ao orçamento previsto para execução do projeto.

Por último, foi estudada a hipótese de implementação de um detetor ótico do tipo barreira. Esta solução é robusta e económica, contudo pode haver alguns problemas na deteção correta devido à distância variável entre os dois elementos (emissor e recetor), pelo que terão de ser realizados testes.

A título de exemplo, a dificuldade do recetor visualizar o emissor será aproximadamente a mesma quando estiverem a 30 mm de distância com algum fumo, ou a 7000 mm de distância sem fumo, uma vez que o sinal será cada vez mais fraco com o aumento da distância.

4.5 Proposta de solução *premium*

No seguimento do processo de escolha da sensorização, foi feita uma pesquisa dos produtos existentes no mercado. Assim, foi escolhida uma solução que prima pela qualidade e que será designada por solução *premium*.

Como solução de melhor qualidade, esta solução visará o cumprimento de todas as especificações propostas pela empresa, assim como será de fácil ligação e configuração, facilitada pelo condicionamento já incorporado em cada um dos sensores. O valor económico destes sensores ultrapassa o valor de orçamento previsto, contudo garantem todos os requisitos previstos.

4.5.1 Aquisição de dados

De modo a conferir alguma robustez eletromagnética e mecânica, a monitorização dos dados provenientes dos sensores e detetor deveria ser realizada com o auxílio de um PLC. A resolução de leitura analógica, o número de entradas e a garantia de fiabilidade são características que influenciam o preço de um PLC.

Por outro lado, seria interessante garantir que o dispositivo de aquisição possuísse comunicação em RS-485 *Profibus*, que é a comunicação *standard* utilizada na empresa e em grande parte dos dispositivos industriais [5].

4.5.2 Seleção do sensor de temperatura *premium*

O sensor de temperatura escolhido para a sensorização da temperatura foi o **JUMO 90/00491506** (ver Figura 4.4).



Figura 4.4 – Sensor de temperatura JUMO 90/00491506 [17]

As características mais relevantes do sensor escolhido encontram-se representadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Características do sensor de temperatura JUMO 90/00491506 [17]

Marca:	JUMO
Referência:	90/00491506
Tipo:	RTD - PT100 com transmissor de corrente
Gama de Temperaturas:	-50 °C a 150 °C
Exatidão	$0,15 + 0,002 \times t$ [°C] (Class A)
Saída:	Corrente (4-20 mA ou 20-4 mA)

Este sensor apresenta uma gama de medição adequada para a aplicação e uma excelente exatidão na leitura da temperatura. A grande vantagem deste sensor é a saída proporcional em corrente (4-20 mA), que torna este sensor fiável em ambientes com elevado ruído. Fisicamente é um sensor robusto e compacto, que apresenta um sistema para fixação por rosca, ideal para a aplicação em estudo [17]. Apresenta contudo um preço elevado, em torno de 250 €.

4.5.3 Seleção do sensor premium de monitorização das condições do ar

O sensor selecionado para monitorizar as condições do ar foi o VAISALA DMT152, que se encontra representado na Figura 4.5:



Figura 4.5 – Sensor VAISALA DMT152 [18]

As caraterísticas do sensor são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 – Caraterísticas do sensor VAISALA DMT152 [18]

Marca:	VAISALA
Referência:	DMT152
Tipo:	Sensor de ponto de orvalho com transmissor de corrente
Gama de medição:	-80 °C a 20 °C (saída analógica escalada)
Exatidão:	± 2 °C (Temperatura do ponto de orvalho)
Saída:	Corrente (4-20 mA ou 0-20 mA)

Este sensor mede a temperatura e humidade, e calcula automaticamente a temperatura de ponto de orvalho. Apresenta uma gama de medição adequada para a aplicação. A exatidão na medição da temperatura de ponto de orvalho é muito elevada e apropriada para a aplicação. A saída proporcional 4-20 mA é preferencial à saída 0-20 mA, permitindo detetar erros na ligação ao sensor. Mais uma vez a saída em corrente é de especial relevância para a aplicação, permitindo evitar problemas de ruído eletromagnético [18]. Apresenta um preço muito elevado, entre 1500 a 2000 €.

4.5.4 Seleção do detetor de barreira/fumo premium

Para detecção de barreira/fumo foi escolhido o sensor PA18CAT20NASA da marca Carlo Gavazzi (Figura 4.6). Este transmissor apresenta baixo atravancamento, ideal para a aplicação em estudo.



Figura 4.6 – Transmissor Carlo Gavazzi PA18CAT20NASA [19]

Na Tabela 3 é possível aferir as características mais relevantes do transmissor:

Tabela 3 – Características do Sensor Carlo Gavazzi PA18CAT20NASA [19]

Marca:	Carlo Gavazzi
Referência:	PA18CAT20NASA
Tipo:	LED Infravermelho
Sinal:	0-20 mA
Saída:	NPN ou PNP

Este detetor cumpre os requisitos anteriormente descritos, contudo carece de testes que permitam avaliar se será possível detetar fumo de modo eficaz. O parafuso existente na face lateral do transmissor permite ajustar a intensidade da emissão, podendo ser benéfico no sentido de aumentar a sensibilidade ao fumo, reduzindo a intensidade [19]. Este transmissor apresenta um custo elevado, aproximadamente 250 €.

4.6 Proposta de solução *low cost*

A proposta de solução anteriormente apresentada possui um custo muito elevado, pelo que foi abandonada.

A empresa sugeriu uma tentativa de aproximação ao problema, criando uma solução *low-cost*. Esta solução permite implementar e testar os componentes, e tirar conclusões sobre o seu

funcionamento. Para além disso permitirá a criação de uma solução funcional, ainda que com menor robustez e fiabilidade. Nesse sentido, a empresa disponibilizou uma verba de 250 euros para levar a cabo o estudo da sensorização de um espelho. Relativamente ao sistema de aquisição de dados, optou-se por recorrer a um microcontrolador.

4.6.1 *Arduíno*

Para realizar a aquisição dos dados dos sensores foi escolhida a placa Arduíno Uno baseada num microcontrolador ATmega328, Figura 4.7.



Figura 4.7 – Arduíno Uno [20]

Esta placa é de uso generalizado, disponibilizando suporte para o hardware e software e apresentando um baixo custo. Para além disso é uma solução que pode ser adquirida com relativa facilidade e é barata (aproximadamente 25 €).

O Arduíno Uno funciona com uma tensão de 5 V, que pode ser fornecida pela porta USB ou analogamente através da *Power Jack* existente na placa. O Arduíno possui 6 portas analógicas de entrada, e 14 portas digitais de entrada/saída, que são suficientes para a leitura dos sensores e detetor pretendidos. Possui ainda 32 KB de memória *flash*, 2 KB de SRAM, 1 KB de EEPROM e uma velocidade de relógio de 16 MHz [20].

A resolução das portas analógicas é de 10 bits, o que permite ler 1024 divisões. Por exemplo, na leitura de temperatura de 0 a 100 °C a resolução máxima teórica seria de:

$$Resolução = \frac{100 - 0}{1024} = 0,097 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

que corresponde à menor divisão que é possível ler. Este valor é perfeitamente aceitável para a aplicação em causa.

No que toca à programação do microcontrolador, esta pode ser realizada em C ou C++ [20].

Comunicação

O Arduino possui comunicação TTL realizada através dos pinos Vcc, Gnd, Rx e Tx (TTL) existentes na placa, ou alternativamente através da porta USB [21]. Para esta comunicação, foram utilizados os valores característicos expressos na Tabela 4:

Tabela 4 – Características da comunicação [21]

<i>Baud rate</i>	9600
Bits de informação	8
Paridade	Sem paridade
<i>Bits de stop</i>	1
<i>HandShaking</i>	<i>Sem HandShaking</i>

As ligações a estabelecer com o computador para efeitos de programação e de validação dos valores poderá ser realizada por USB. Contudo, para ligar o Arduino a outro tipo de dispositivos, nomeadamente interfaces homem-máquina ou outro tipo de equipamento industrial, seria mais interessante e adequada a utilização de um barramento RS-422/RS-485.

A comunicação RS-232 é uma comunicação série que permite conectar o Arduino a outros equipamentos. Os protocolos físicos RS-422 e RS-485 são barramentos mais interessantes em ambiente industrial, uma vez que apresentam um balanceamento de sinal e permitem a ligação de vários dispositivos. Uma vez que nesta fase é pretendida a criação de um modelo piloto, a interface para leitura e validação dos sensores será realizada em laboratório. Desta forma não será necessária a implementação de um barramento/cabo balanceado. Para além disso a construção de um protocolo RS-232 é mais económico, o que torna preferencial aos demais protocolos.

4.6.2 Seleção do sensor de temperatura low cost

A ADIRA definiu alguns fornecedores e marcas preferenciais para aquisição do material. Depois de alguma pesquisa, contactos e reuniões, verificou-se que não seria viável a compra de equipamento dos fornecedores e marcas indicados, dado que os preços ultrapassavam o orçamento previsto. Foi então realizada uma pesquisa mais alargada, e foi escolhido um sensor de temperatura com a designação Thermomart NTC10K-S, visível na Figura 4.8.



Figura 4.8 – Sensor de temperatura Thermomart NTC10K-S

Este sensor de temperatura é um termístor que apresenta uma diminuição da resistência com o aumento da temperatura (Coeficiente Negativo; NTC) apresentando para uma temperatura de 25°C a resistência de 10 kΩ. O Termístor poderá apresentar um erro de 3% na sua resistência em relação aos valores de referência tabelados, contudo é possível ajustar e reduzir esse erro através da caracterização específica do sensor utilizado. O preço deste termístor enquadra-se no orçamento previsto, rondando os 10 € [22].

A escolha deste sensor recai essencialmente no compromisso entre robustez e preço, sem comprometer a leitura. O material do sensor é aço inoxidável (Stainless Steel 304), o que lhe confere uma boa resistência mecânica, robustez e longevidade [22].

Contudo o revestimento do sensor aumenta o tempo de resposta. O sensor responde relativamente rápido a subidas e descidas de temperatura quando em contacto com um material que lhe permita transferência de energia térmica. Contudo, a resposta quando é efetuada em leituras sem contacto é muito lenta, pelo que será conveniente usar este sensor em contacto direto com o espelho a medir.

O sensor dispõe ainda de uma rosca M8, o que permite a sua fixação ao suporte.

Disposição física do sensor de temperatura

De modo a garantir resultados satisfatórios, a disposição física do sensor de temperatura deverá cumprir alguns requisitos, que são os seguintes:

- a) Garantir o contacto do sensor com o espelho para que a resposta seja a mais rápida possível. Se tal não for possível, poderá ser adotada uma medição da temperatura nos componentes que envolvem o espelho, que são metálicos, logo bons condutores térmicos;
- b) Impor um encosto permanente e orientado da mesma forma entre o espelho e o sensor de temperatura, de modo a evitar flutuações da temperatura;
- c) Não implementar o sensor no próprio espelho, sob pena de poder afetar a calibração e direção do mesmo;

- d) Não existe flexibilidade no sentido de alterar a disposição de nenhum componente agregado ao espelho. Assim, deverá ser tida em conta a disposição de todos os elementos de fixação já existentes;
- e) Garantir que esta aplicação não irá criar nenhum entrave à remoção do espelho para limpeza/substituição. O espelho deverá estar sempre acessível e neste sentido a hipótese de furar o espelho não é viável pois complicaria o processo de mudança;
- f) Manter um bom aspeto estético, ainda que não sendo um requisito prioritário.

Descritos todos os condicionantes associados à aplicação do sensor de temperatura, a melhor solução encontrada foi efetuar um furo numa direção paralela à face do espelho, e colocar o sensor numa disposição radial. Para o efeito foi criado um modelo no *software* SolidEdge V20, como é possível verificar na Figura 4.9.

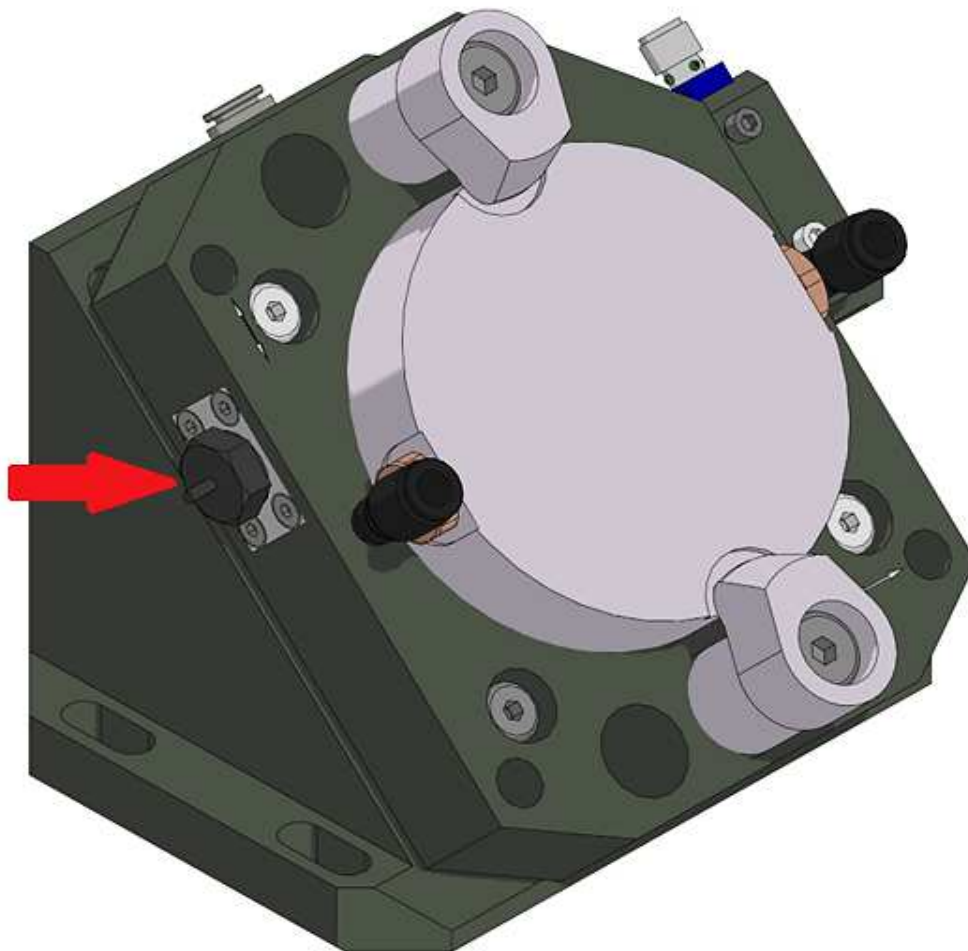


Figura 4.9 – Montagem do sensor de temperatura

De forma a garantir um contacto permanente entre o espelho e o sensor, será colocada uma mola. Para tal, o sensor será roscado num casquilho, e a mola ficará entre a tampa e o casquilho, garantindo encosto do termístor ao espelho.

Será colocado no casquilho um pequeno alojamento para um vedante, que dada a inexistência de dinâmica nesta montagem poderá ser um o-ring, garantindo a estanquidade do caminho ótico.

A montagem descrita foi realizada em CAD, e pode ser visualizada na Figura 4.10.

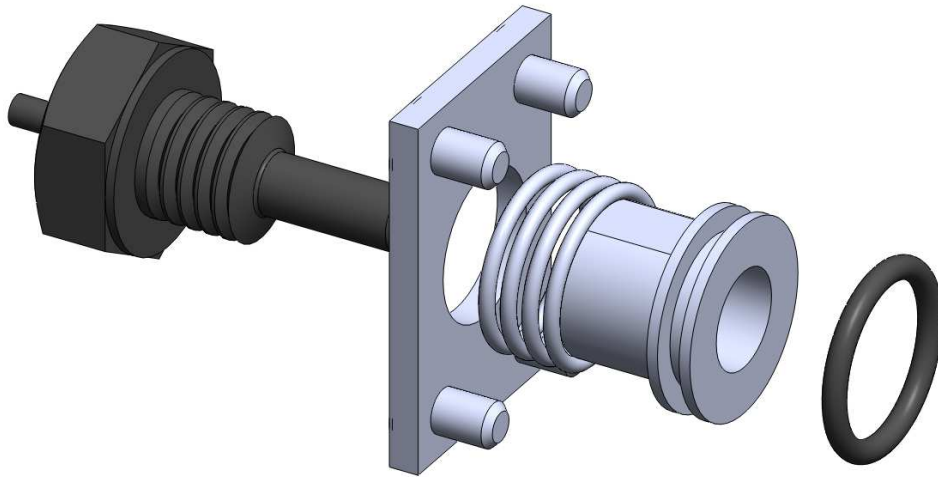


Figura 4.10 – Termístor com casquilho

É ainda possível na Figura 4.11 ver a implementação do termístor num corte do modelo 3D.

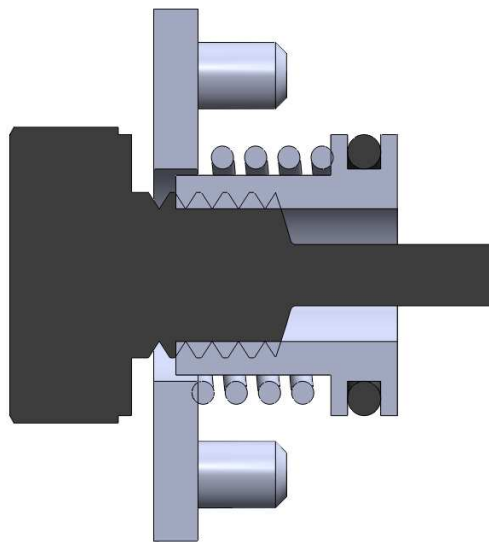


Figura 4.11 – Disposição do termístor em corte do Modelo 3D

Os movimentos do conjunto poderão atingir acelerações de 2 g, contudo foi salvaguardada essa hipótese já que a mola se encontra num plano perpendicular ao deslocamento, não gerando movimentos desnecessários.

A tampa e os parafusos a utilizar são embutidos, de modo a não criar problemas estéticos nem atravancamentos desnecessários.

Caso se venha a verificar que a condução térmica através do casquilho tem elevada influência/atraso na leitura das variações de temperatura, poder-se-á recorrer a um material alternativo, nomeadamente a um revestimento cerâmico ou polimérico, que permita um isolamento térmico.

4.6.3 Seleção do sensor low cost de monitorização das condições do ar

Foram procuradas soluções de baixo custo capazes de medir a temperatura e a humidade relativa. O sensor escolhido para a medição da temperatura e humidade relativa foi o *Sensirion SHT15 breakout board* que se encontra representado na Figura 4.12.

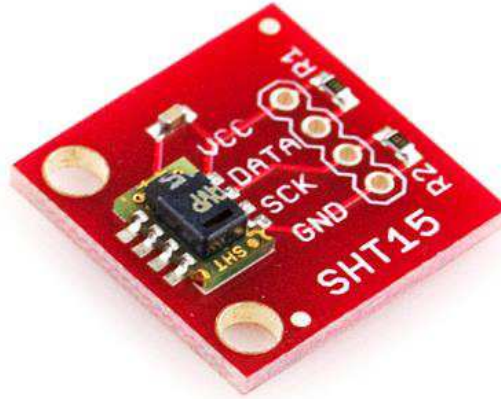


Figura 4.12 – Sparkfun SHT15 Breakout

Na Tabela 5 estão expressas as características do sensor:

Tabela 5 – Características do Sensor Sensirion SHT15 [23]

Marca:	SENSIRION
Referência:	SHT15
Gama da temperatura:	Entre -40°C a 123.8°C
Exatidão da temperatura:	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ até $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$
Gama humidade relativa:	0 – 100%
Exatidão humidade relativa:	$\pm 2\%$ até $\pm 4\%$
Comunicação:	Digital (I ² C)

Este sensor permite uma leitura satisfatória dos valores da temperatura e da humidade relativa e cálculo da temperatura de ponto de orvalho por um preço (aproximadamente 35 €) bastante inferior às anteriores propostas.

Disposição física do sensor de monitorização das condições do ar

Este sensor, de modo a monitorizar as condições do ar, deverá necessariamente estar dentro do caminho ótico. Dadas as suas reduzidas dimensões, poderá ser colocado dentro do fole ou na proximidade de um espelho.

Uma vez que o fole é flexível e têm movimento, a hipótese de implementação no fole é menos interessante, pelo que a implementação nas imediações de um dos espelhos seria preferencial.

Existem algumas particularidades associadas à implementação deste sensor, nomeadamente:

- o sensor deve ser colocado numa posição que não interfira com os demais componentes do espelho;

- este sensor deve ser interno ao caminho ótico e os orifícios de saída dos fios devem ser vedados;
- não deve estar encostado a nenhuma superfície do espelho/suporte, sob pena de aquecer.

Foi decidido que o sensor deveria ficar alojado numa face lateral do suporte do espelho e que deveria ser feito um furo de 8 mm de diâmetro de contacto com o caminho ótico. O ar que circula nesse furo é pressurizado e proveniente do caminho ótico. Esta proposta de solução foi desenhada em CAD, recorrendo ao software SolidEdge V20, e encontra-se devidamente explícita na Figura 4.13.

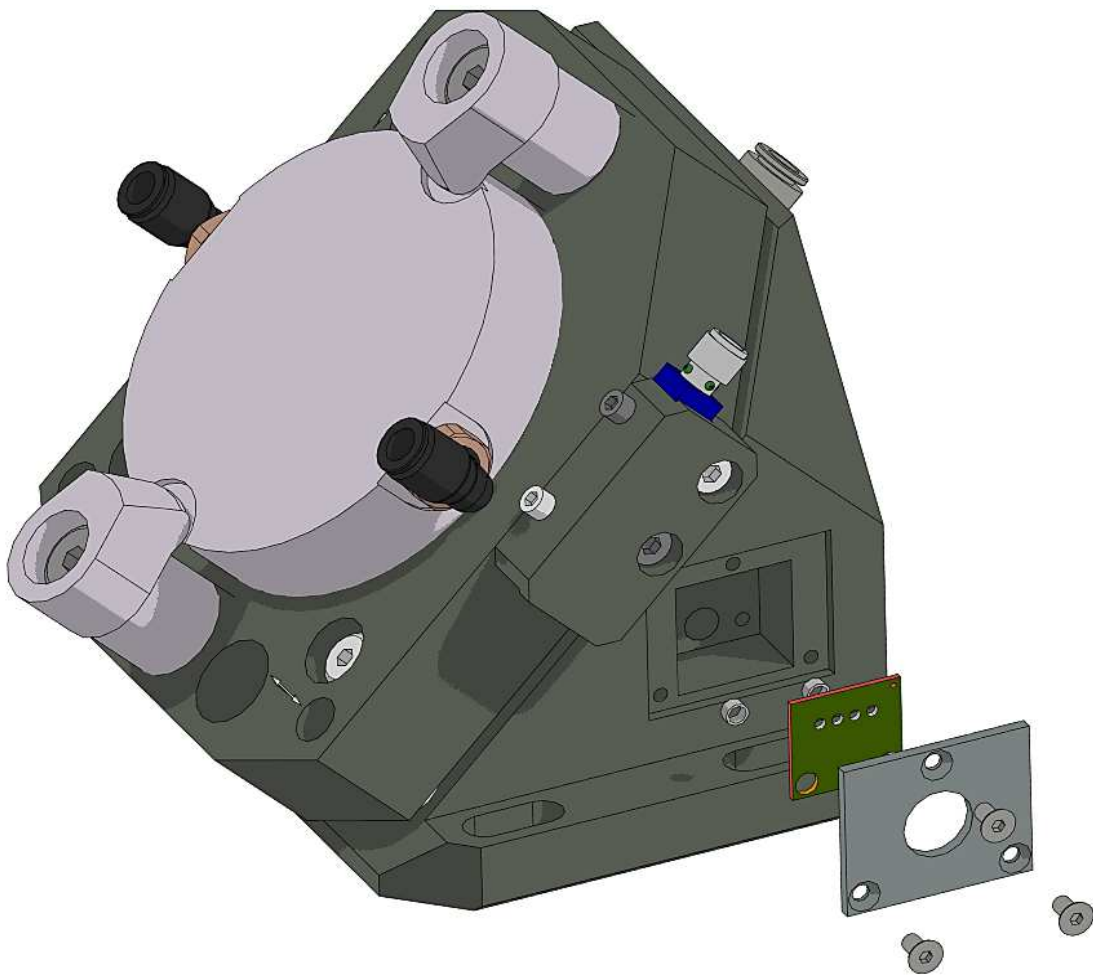


Figura 4.13 – Vista explodida da implementação do sensor SHT15

O furo que permite a passagem do ar deverá ser roscado, permitindo uma modularidade da solução. Assim, caso se pretenda remover a solução poderá ser colocado um taco roscado no furo, vedando o caminho ótico. É ainda aplicada uma tampa, e a saída dos cabos é feita através de um bocim de 3 mm, que serve para efeitos de vedação. A solução final é visível na Figura 4.14.

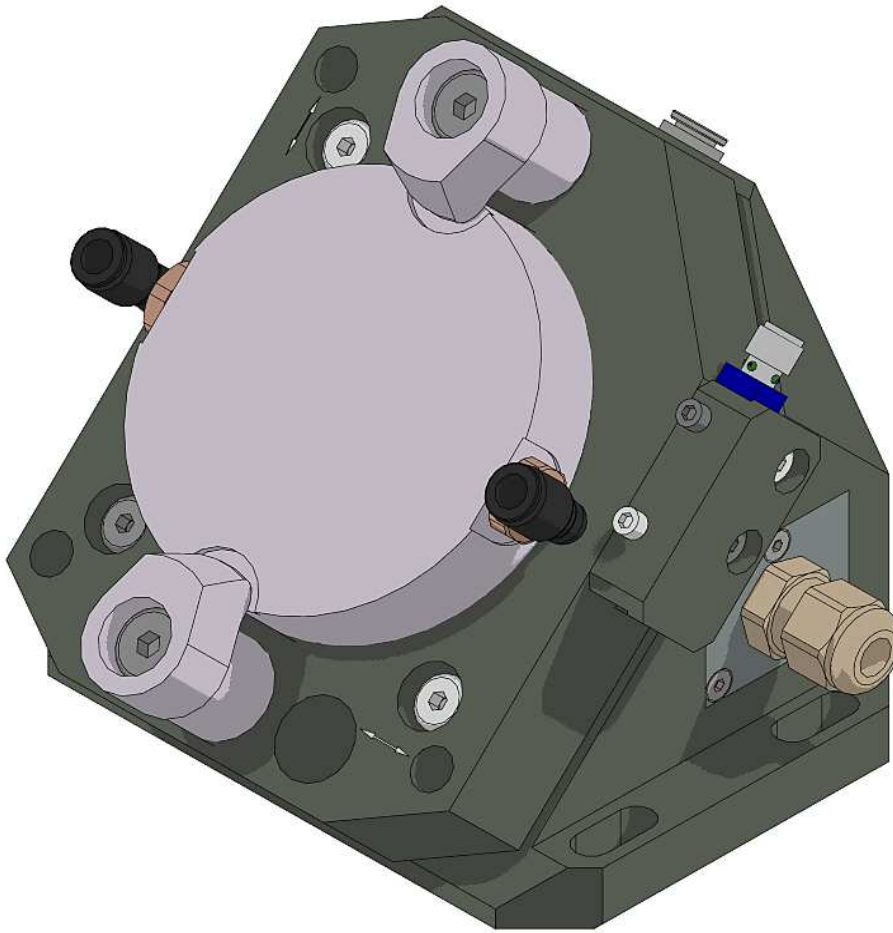


Figura 4.14 – Aspeto final da implementação do sensor SHT15

4.6.4 Seleção do detetor de barreira/fumo low cost

Após alguma pesquisa no mercado, foram escolhidos o emissor e recetor da Banner, S186E e S18SP6R [24]. O emissor e recetor, como visível na Figura 4.15, apresentam pequenas dimensões pelo que serão indicados para a aplicação.



Figura 4.15 – Banner S186E (a) e Banner S18SP6R (b) [24]

Este conjunto emissor/recetor tem um alcance máximo de 20 metros, pelo que poderá ser utilizado em todas as gamas de máquinas da ADIRA. Ambos são alimentados a tensões entre 10 V a 30 V. A saída do detetor é em transístor do tipo NPN, com um valor semelhante ao da alimentação. O comprimento de onda do sinal emitido encontra-se na gama de infravermelho [24]. O preço do detetor ronda os 150 euros [24].

Disposição Física do Detetor de Barreira/Fumo

Sendo o objetivo a deteção de barreiras e fumo, o sensor deverá ser colocado ao longo do caminho ótico. O caminho ótico é extensível e solidário com o deslocamento da cabeça de focagem da máquina, pelo que, numa situação limite, o caminho ótico irá variar entre 30 mm e 3000 mm (que poderá atingir 7000 mm noutros modelos de máquinas de corte por laser da ADIRA).

Existem duas hipóteses para a implementação dos sensores escolhidos:

- implementação no interior do fole, paralela ao feixe laser – o que implica uma modificação estrutural simples no desenho do fole;
- implementação ao longo do *bypass*.

A implementação do emissor e recetor poderá ser realizada ao longo do caminho ótico e paralelamente ao feixe laser, se a empresa permitir a alteração da estrutura do fole. Para proceder à implementação, será necessário abrir um furo de 16 mm em cada uma das extremidades do fole. Esse furo deverá ser situado num canto superior do fole, de modo a detetar com maior facilidade e rapidez quedas do fole. É possível visualizar a montagem descrita na Figura 4.16.

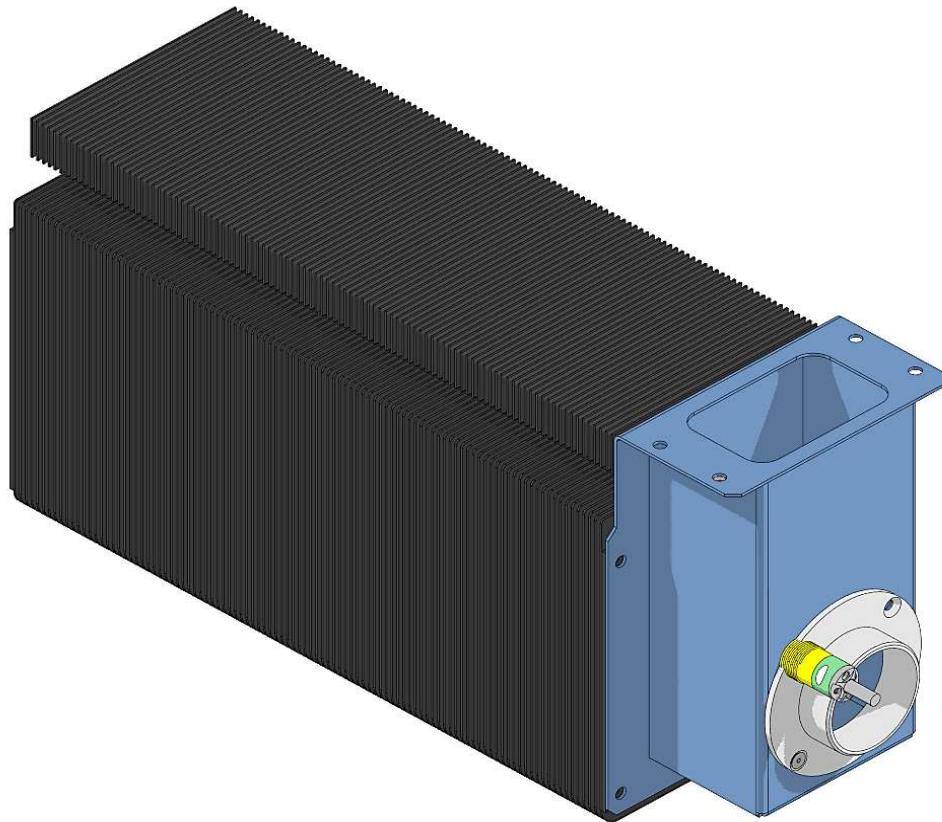


Figura 4.16 – Montagem do detetor de barreira

Esta implementação tem uma desvantagem associada, que é a perda de rigidez do fole. Para compensar esse facto, seria interessante manter o fole simétrico e realizar dois furos nos cantos superiores, ou projetar uma solução alternativa, aumentando o tamanho do fole (ver Figura 4.17).

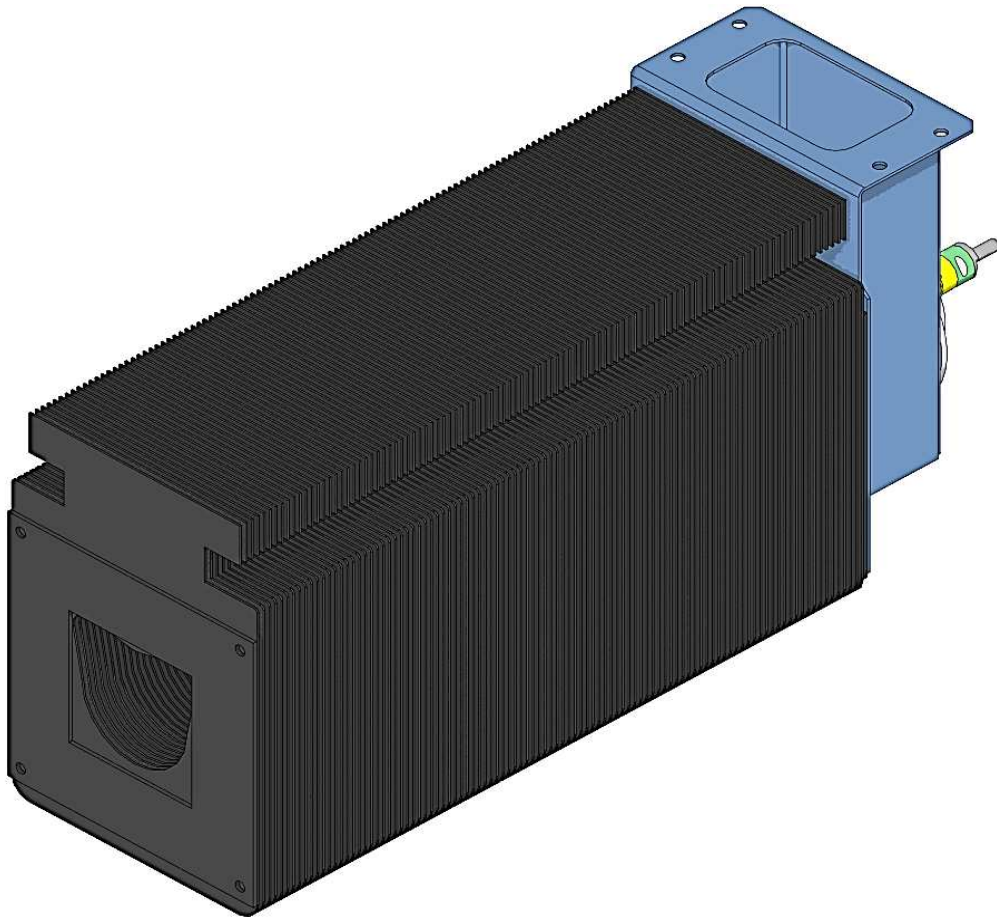


Figura 4.17 – Alterações do fole

A empresa mostrou-se recetiva às alterações necessárias, contudo decidiu não avançar para já com a implementação deste sensor.

A colocação do sensor ao longo do caminho ótico traria muitas vantagens inerentes quando comparada com a implementação no *bypass* (Figura 4.18), como por exemplo:

- **na deteção da queda do fole**, pois caso o sensor estivesse colocado no *bypass*, apenas seria detetado o fumo gerado pela queima do fole. O dispositivo funcionaria apenas como aviso de dano, e não como prevenção (contudo a queda do fole poderá ser detetada pelo exterior de forma simples);
- **o tempo de resposta para um caso de fumo** será mais rápido, especialmente se o eixo em questão da máquina não estiver em movimento (não ocorre movimentação forçada do ar);
- em algumas máquinas antigas **o sistema *bypass* não existe**, pelo que o conceito de *Retrofit* inicialmente proposto não poderia ser integralmente cumprido com essa solução.

Nesse sentido, seria importante manter a proposta de implementação ao longo do fole.

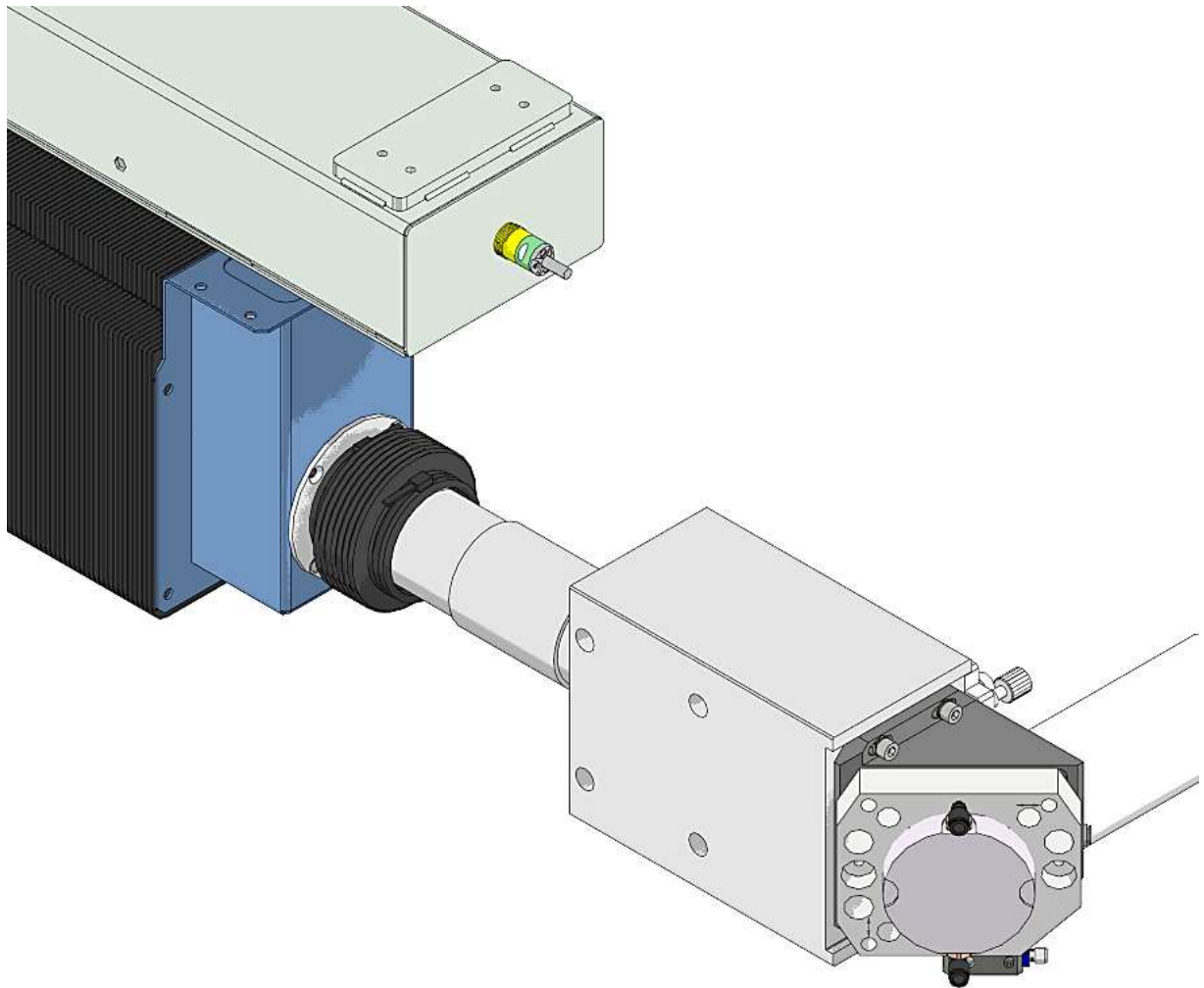


Figura 4.18 – Implementação do detetor no *bypass*

Outra proposta de solução para o problema dimensional que poderá ser adotada é o recurso a uma fibra ótica. O emissor e o recetor deverão estar ligados ao caminho ótico por meio de uma fibra de pequenas dimensões.

Esta proposta de solução só terá validade se for testada, porque existem vários entraves à sua implementação, nomeadamente:

- dificuldade de transmissão e alinhamento do feixe infravermelho;
- necessidade de óticas para focalizar o infravermelho na fibra;
- não existem dados que permitam saber se a deteção será eficaz.

5 Implementação da Proposta de Solução *Low Cost*

No sentido de dar continuidade ao projeto, foram adquiridos os sensores propostos na solução low cost e procedeu-se à sua implementação em laboratório.

5.1 Implementação dos sensores

5.1.1 Sensor de temperatura

Para a medição da temperatura usando o termistor é necessário determinar a característica do sensor, isto é, a equação que relaciona a temperatura com a resistência medida.

O sensor de temperatura utilizado, Thermomart NTC10K-S pode ser usado para leituras entre -50°C e 350°C . Este termistor apresenta uma característica não linear, sendo que os valores A, B e C da equação de Steinhart-Hart para determinação da característica não são fornecidos [25]. Em alternativa é disponibilizada uma tabela com os valores da resistência média em função da temperatura. Assim, foi aproximada na gama de temperatura entre -20°C a 120°C , porque é essa a gama de temperaturas do espelho que se pretende ler.

Usando o *software Matlab 2012* foram testadas várias equações de aproximação e concluiu-se que a melhor seria a apresentada na Figura 5.1, onde é possível verificar os coeficientes e o grau de ajuste de R^2 , 0,9998.

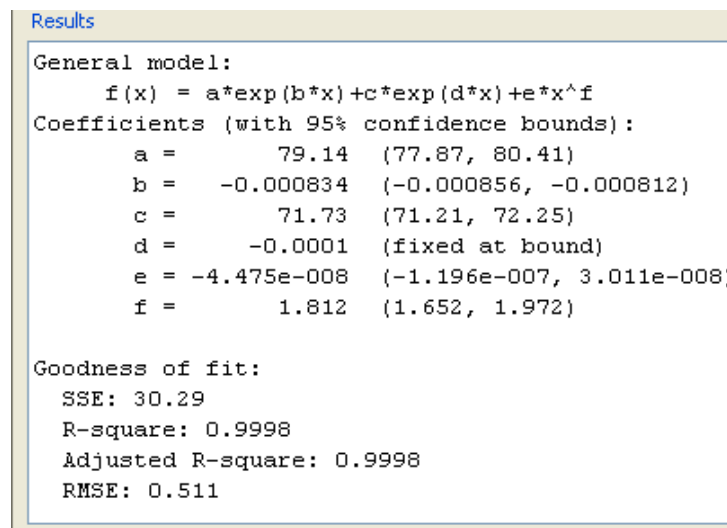


Figura 5.1 – Valores da aproximação da curva característica do termistor

A Figura 5.2 mostra a representação gráfica da curva do termistor (temperatura versus resistência) e os pontos tabelados.

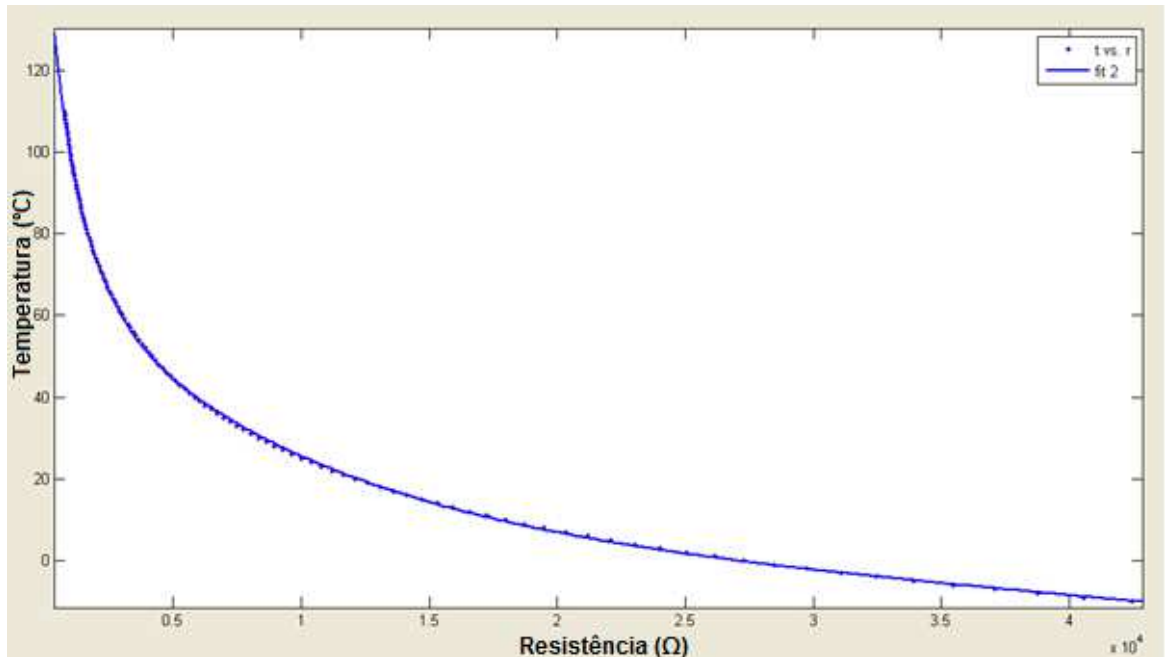


Figura 5.2 – Aproximação da curva do termistor (temperatura versus resistência)

Uma vez conhecida a equação da resistência em função da temperatura, será necessário medir essa resistência através do Arduino.

Foi determinada a resistência através de um divisor de tensão, como é mostrado na Figura 5.3. A resistência fixa foi colocada no sentido de criar um divisor de tensão, de modo a obter uma tensão de saída proporcional à tensão de entrada.

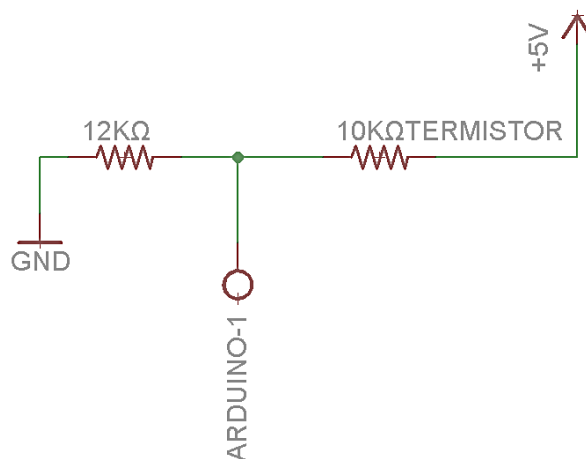


Figura 5.3 – Divisor de tensão

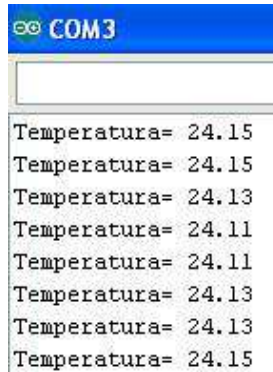
A tensão de saída Arduino1 é dada pela equação 5.1.

$$Arduino1 = \frac{R_{termistor}}{R_{termistor} + 12000} \times 5 \quad (5.1)$$

De onde é possível obter a resistência do termistor.

$$R_{\text{termistor}} = \frac{12000 \times 5}{\text{Arduino1}} - 12000$$

De modo a garantir uma leitura estável e menos suscetível a ruído, foi implementado um filtro de média móvel. O resultado das leituras realizadas no laboratório é visível na Figura 5.4:



```

COM3
Temperatura= 24.15
Temperatura= 24.15
Temperatura= 24.13
Temperatura= 24.11
Temperatura= 24.11
Temperatura= 24.13
Temperatura= 24.13
Temperatura= 24.15

```

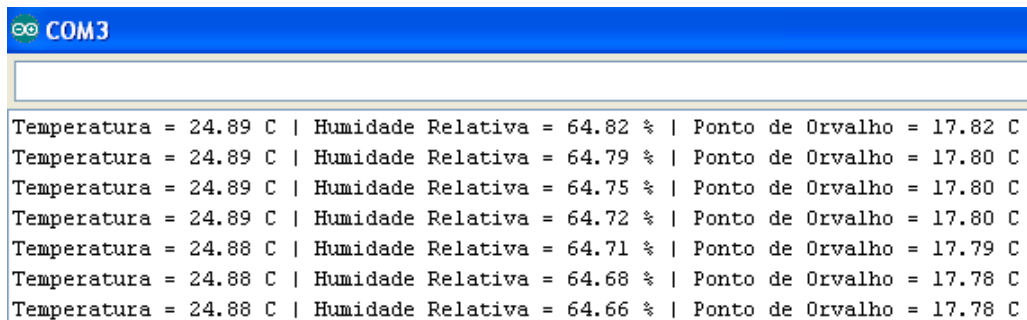
Figura 5.4 – Resultado do sensor de temperatura

Os erros associados ao termistor são de 3% do valor da resistência, o que corresponde a um erro de 0,7 °C em torno da temperatura ambiente (25 °C) e um erro máximo de 2.5 °C nos extremos.

5.1.2 Sensor das condições do ar

Este sensor, Sensirion SHT15, apresenta uma saída digital do tipo I²C, pelo que é independente do valor da resolução de leitura do Arduino.

O aspeto das leituras efetuadas com o código C++ implementado é o mostrado na Figura 5.5.



```

COM3
Temperatura = 24.89 C | Humidade Relativa = 64.82 % | Ponto de Orvalho = 17.82 C
Temperatura = 24.89 C | Humidade Relativa = 64.79 % | Ponto de Orvalho = 17.80 C
Temperatura = 24.89 C | Humidade Relativa = 64.75 % | Ponto de Orvalho = 17.80 C
Temperatura = 24.89 C | Humidade Relativa = 64.72 % | Ponto de Orvalho = 17.80 C
Temperatura = 24.88 C | Humidade Relativa = 64.71 % | Ponto de Orvalho = 17.79 C
Temperatura = 24.88 C | Humidade Relativa = 64.68 % | Ponto de Orvalho = 17.78 C
Temperatura = 24.88 C | Humidade Relativa = 64.66 % | Ponto de Orvalho = 17.78 C

```

Figura 5.5 – Resultado do Sensor das condições do ar

O erro de temperatura associado a este sensor encontra-se representado na Figura 5.6.

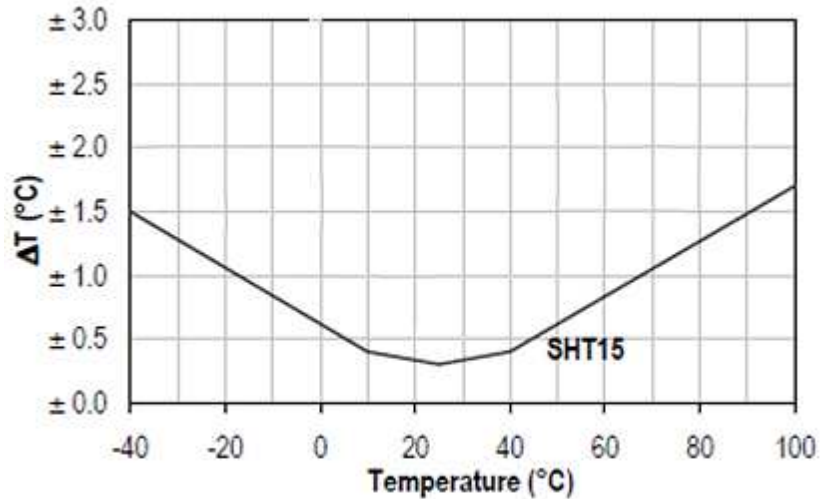


Figura 5.6 – Erro de temperatura do sensor SHT15 (°C) [23]

Na Figura 5.7 é possível visualizar o erro de humidade relativa do sensor SHT15.

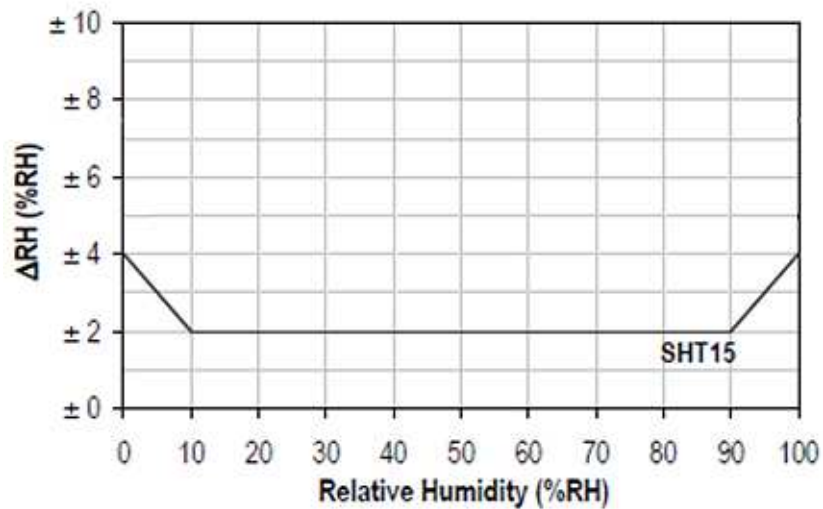


Figura 5.7 – Erro de humidade relativa do sensor SHT15 (%) [23]

5.1.3 Detetor de barreira/fumo

A saída do recetor é de 24 V, semelhante à tensão de alimentação. Para integração com o Arduino será necessária a redução da tensão, uma vez que o Arduino apenas permite entradas até 5 V. Para ultrapassar esta dificuldade foi utilizado um acoplador ótico 4N25, montado como indica a Figura 5.8.

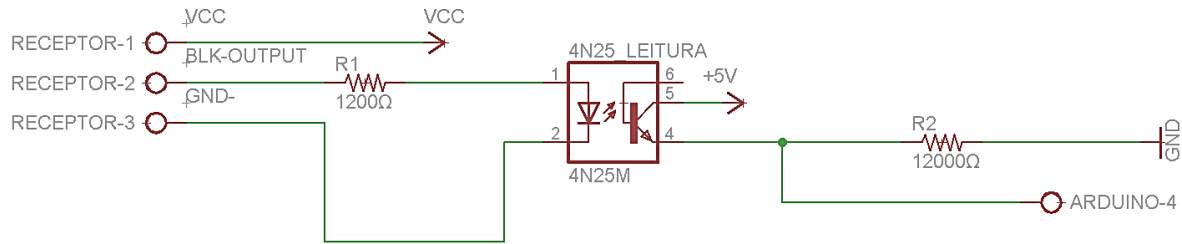


Figura 5.8 – Redução de tensão com acoplador ótico

A alimentação de 5 V, representada à direita, será proveniente do Arduino. A alimentação do emissor e recetor de infravermelho será realizada a 24 V, tensão que se encontra disponível na máquina.

5.2 Interface de aquisição de dados

A aquisição de dados foi realizada com auxílio de um computador, recorrendo à porta USB. Para uma cómoda implementação e leitura dos dados, foi necessária a simplificação do sistema e da cablagem utilizada.

5.2.1 Interface física

Para simplificação do sistema foi desenvolvida uma placa de interface dos sensores e detetor.

A placa desenvolvida contempla os sistemas desenvolvidos individualmente, nomeadamente:

- leitura da temperatura;
- leitura do estado do recetor infravermelho;
- leitura do estado (ligado/desligado) do emissor infravermelho;

Foram ainda incluídos dois LED's que permitem verificar as ligações da placa e dois díodos Zener que garantem segurança contra excesso de tensão e troca dos fios de alimentação.

O diagrama esquemático da placa está representado na Figura 5.9.

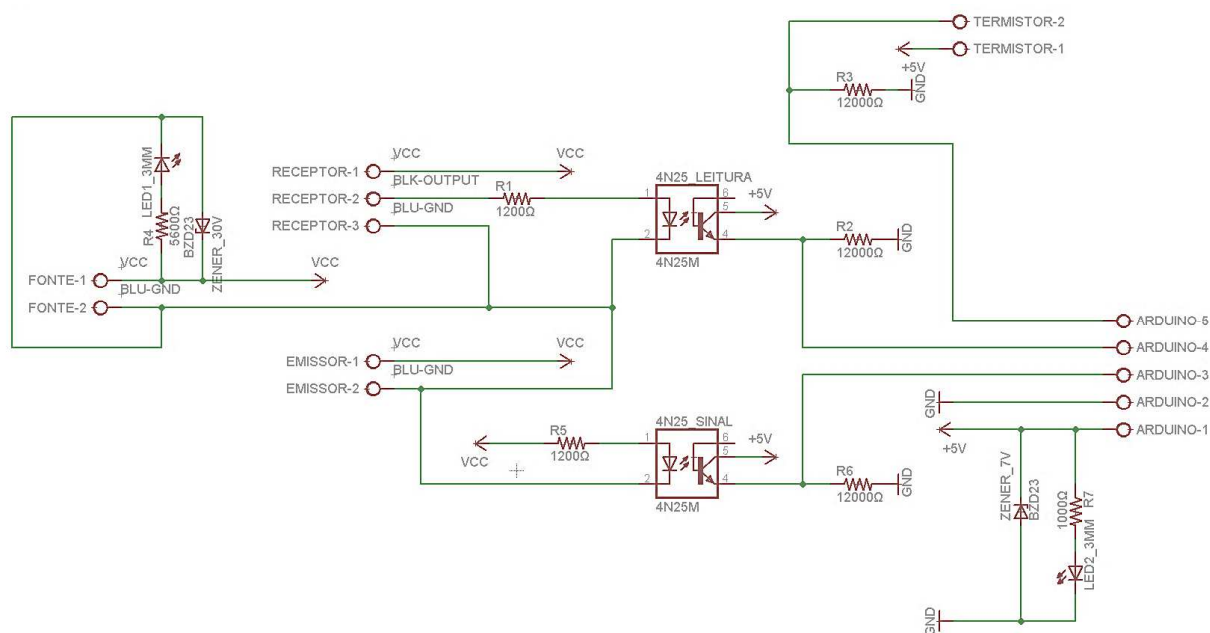


Figura 5.9 – Diagrama esquemático da placa de interface

Na Figura 5.10 pode ser verificado o aspeto final da placa de interface.

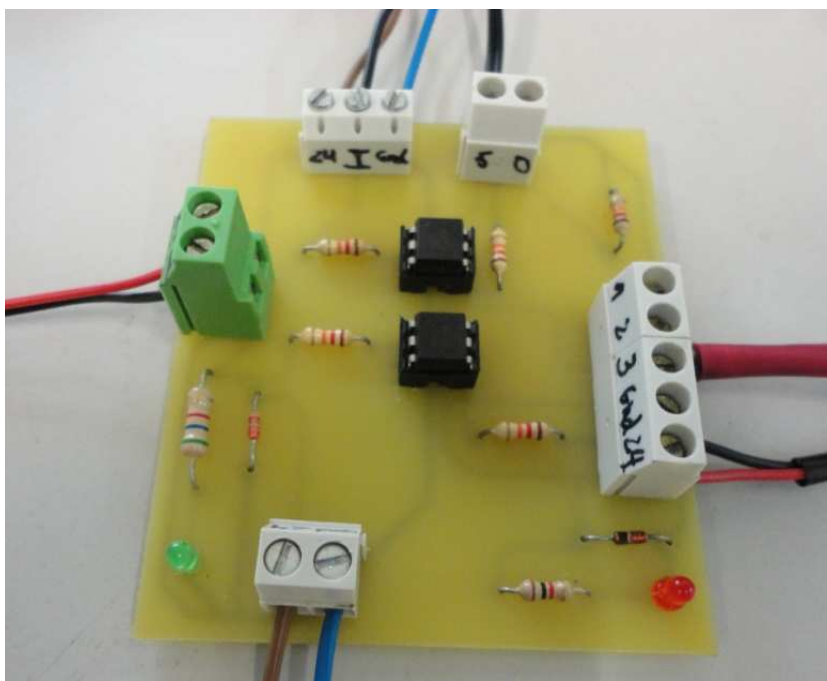


Figura 5.10 – Aspeto final da placa de interface

O desenho da placa de interface dos sensores encontra-se disponível no Anexo A.

A montagem completa dos sensores e da placa de interface é visível na Figura 5.11:

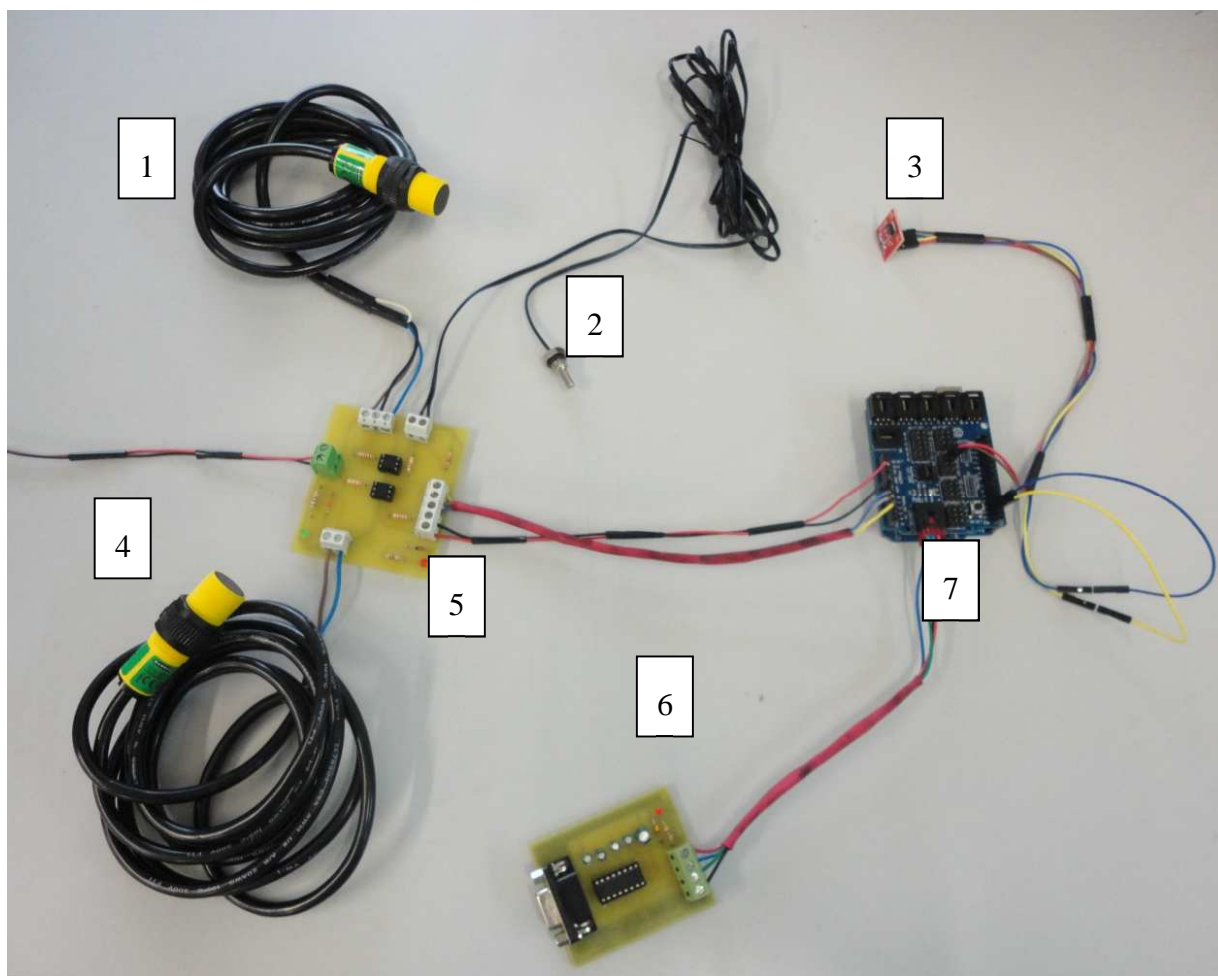


Figura 5.11 – Montagem completa dos sensores

Os componentes numerados na Figura 5.11 encontram-se descritos na Tabela 6:

Tabela 6 – Componentes montados

Número	Componente
1	Banner S18SP6R (recetor infravermelho)
2	Thermomart NTC10K-S (sensor de temperatura de contacto)
3	Sensirion SHT15 (sensor de temperatura e humidade relativa)
4	Banner S186E (emissor infravermelho)
5	Placa de interface
6	Conversor RS-232
7	Arduino Uno

5.2.2 Leitura das variáveis

Para leitura dos valores provenientes do Arduino foi utilizado o software *LabVIEW* 2012.

O *LabVIEW* é um software de desenvolvimento de sistemas de medição e controlo da *National Instruments* (www.ni.com). É largamente utilizado em engenharia, dadas as suas potencialidades no desenvolvimento de aplicações de aquisição de dados e interface com instrumentos.

Foi desenvolvido um programa de aquisição de dados em *LabVIEW* que permite, para além de ler os valores enviados pelo Arduino, as seguintes funcionalidades:

- interface de fácil compreensão;
- representação gráfica das variáveis;
- registo temporal das variáveis;
- criação de alarmes.

A Figura 5.12 mostra o aspeto da interface desenvolvida:

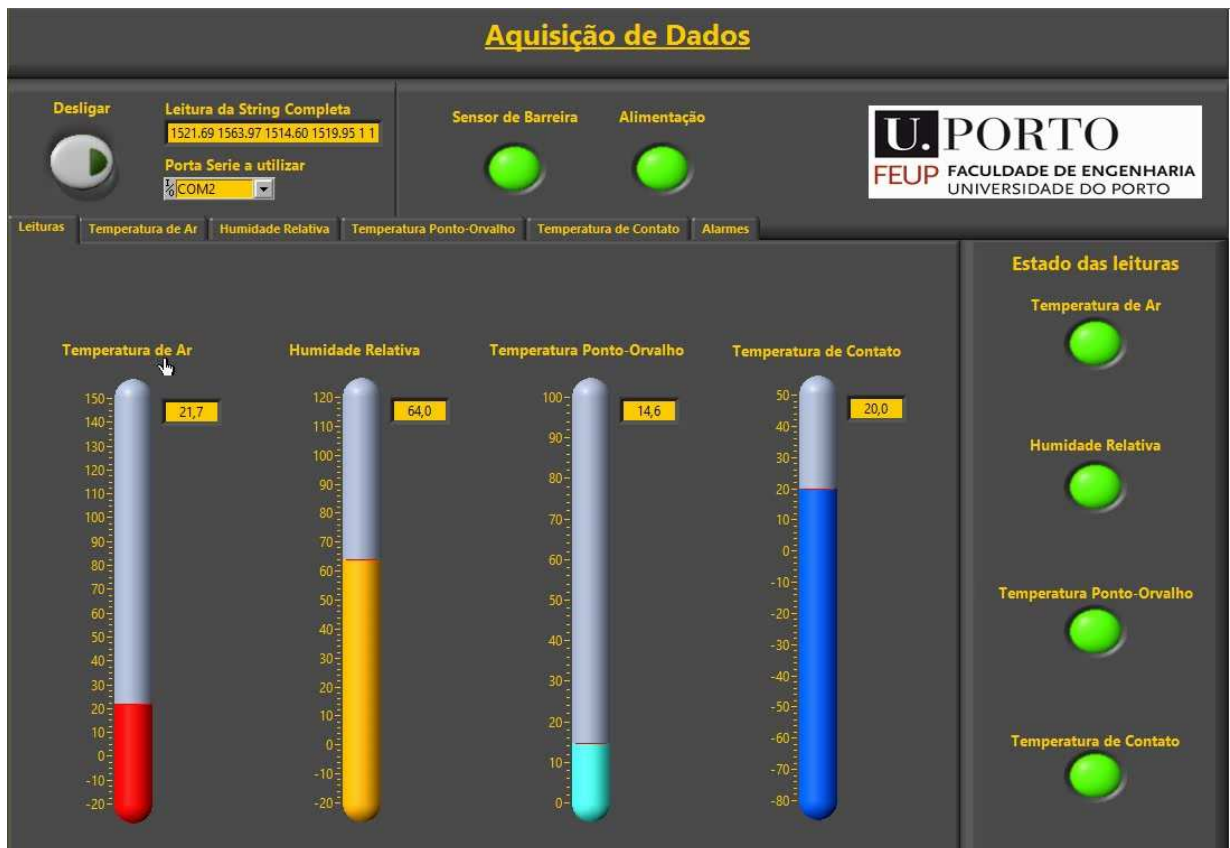


Figura 5.12 – Interface em *LabVIEW*

Em cada uma das abas é possível visualizar um gráfico da respetiva variável, assim como ajustar os limites inferior e superior (Figura 5.13).

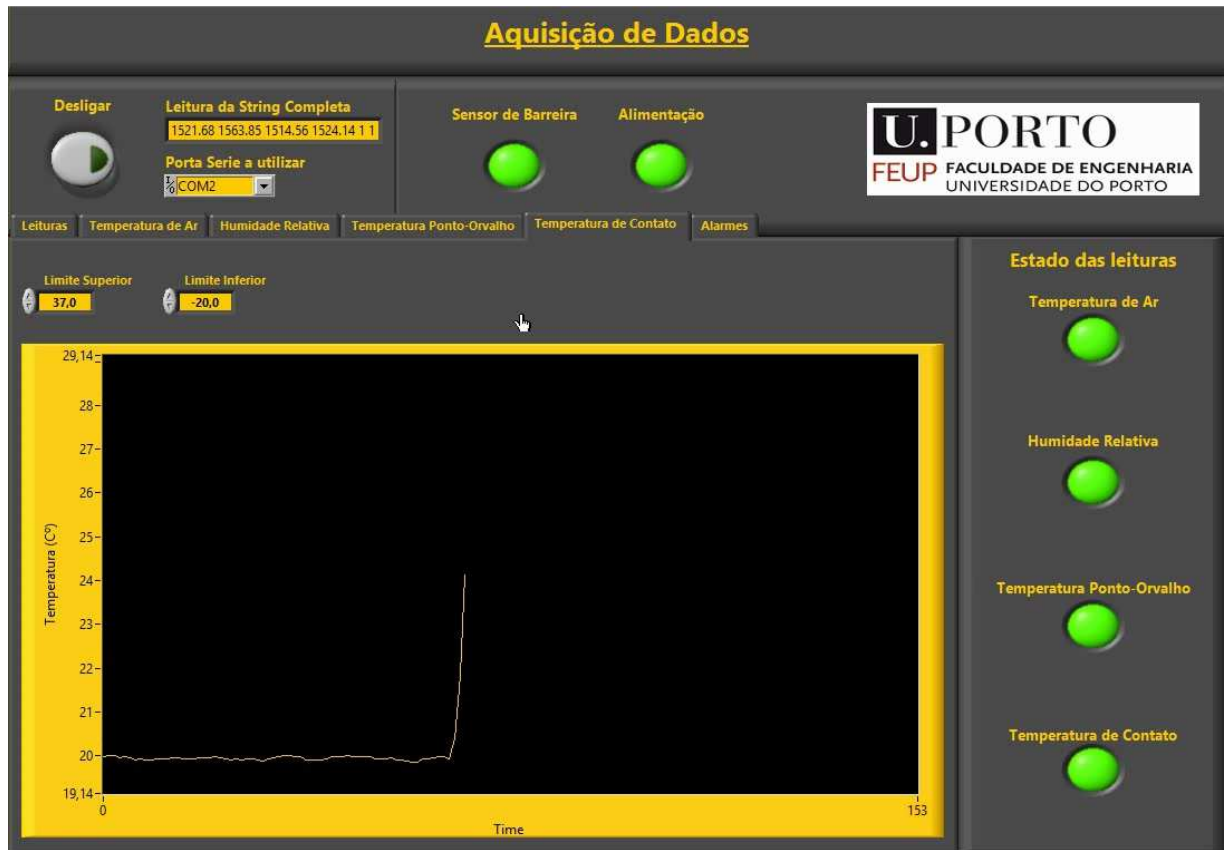


Figura 5.13 – Pormenor da leitura da temperatura de contacto (aquecimento do sensor)

5.3 Interface em HMI

De modo a dotar o sistema de maior robustez, foi utilizada uma HMI para a leitura dos valores fornecidos pelo Arduino. Nesse sentido, foram analisados os equipamentos existentes:

- Omron NQ3-MQ000-b
- National Instruments TPC2006

5.3.1 Comunicação RS-232

Para que seja possível estabelecer a comunicação entre o Arduino e uma qualquer HMI industrial, será necessário que ambos comuniquem na mesma linguagem. Tipicamente a entrada de dados das HMI é realizada num protocolo série RS-232, contudo o Arduino, como referido anteriormente, apenas tem saídas digitais TTL e USB.

Ambas as HMI referidas comunicam em série RS-232, dispondo de porta USB que serve apenas para efeito de programação, pelo que será necessário proceder à implementação de um conversor de comunicação. Para a conversão do sinal será necessária a utilização de um circuito integrado, MAX 232, ou algo similar [26]. O circuito criado é visível na Figura 5.14.

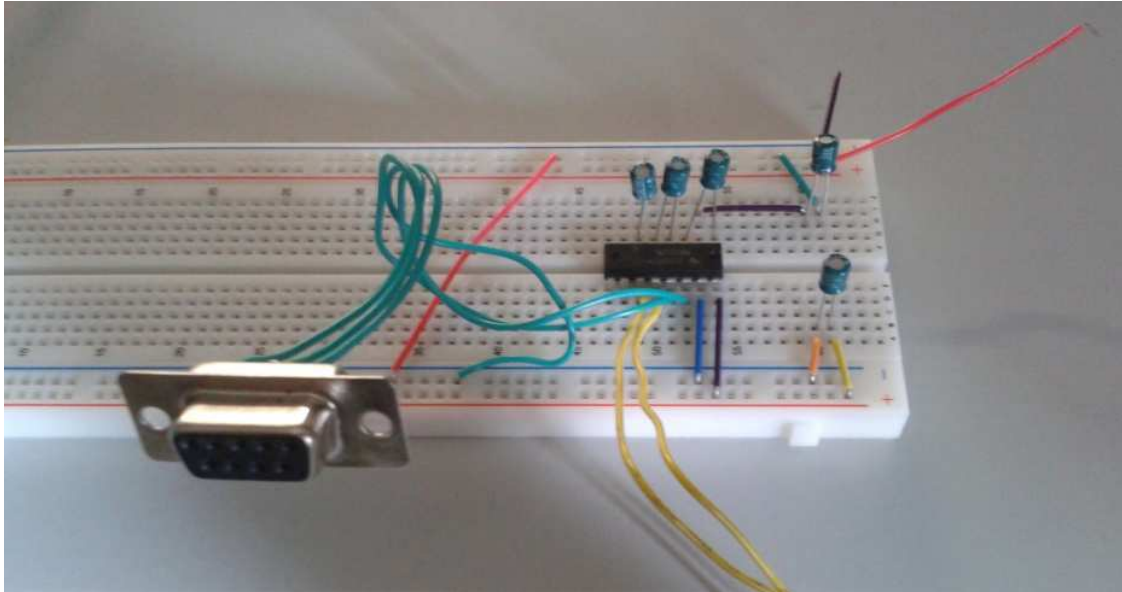


Figura 5.14 – Circuito MAX232

De modo a reduzir a cablagem, foi desenvolvida uma placa (Figura 5.15) que contempla o circuito integrado e todo o circuito anexo, incluindo os terminais RS-232 para permitir estabelecer a ligação entre Arduino/HMI.

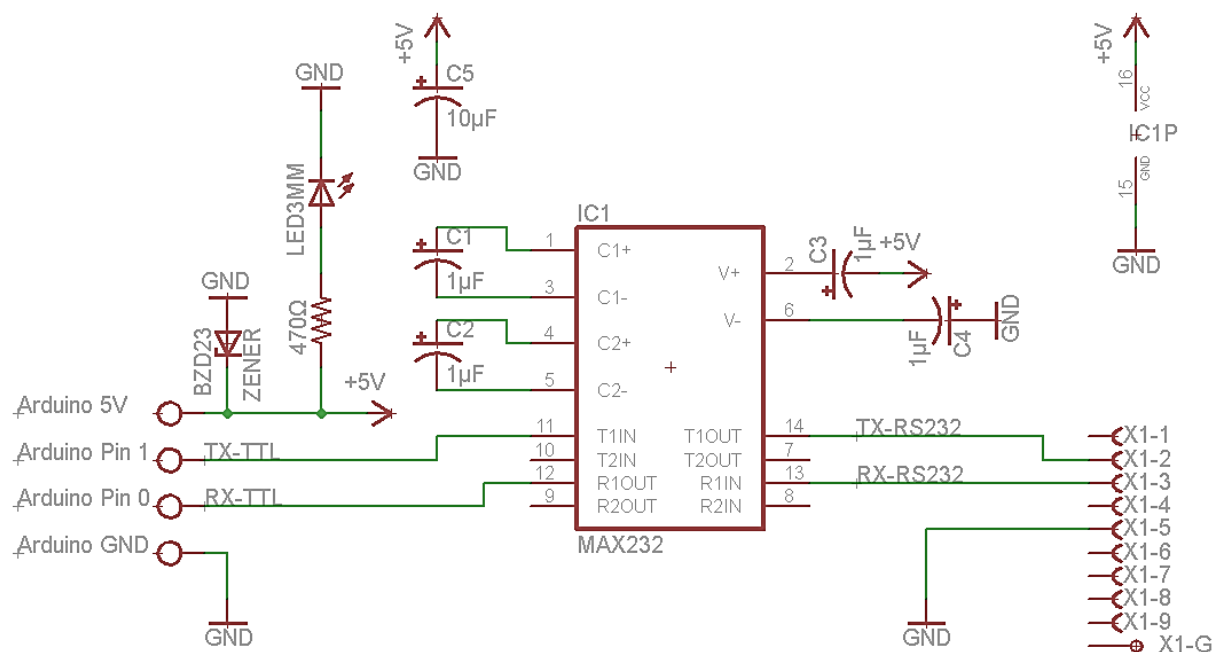


Figura 5.15 - Esquemático da placa de conversão TTL/RS-232

Este circuito permite converter os sinais TTL do Arduino em RS-232. O aspeto final da placa é visível na Figura 5.16.

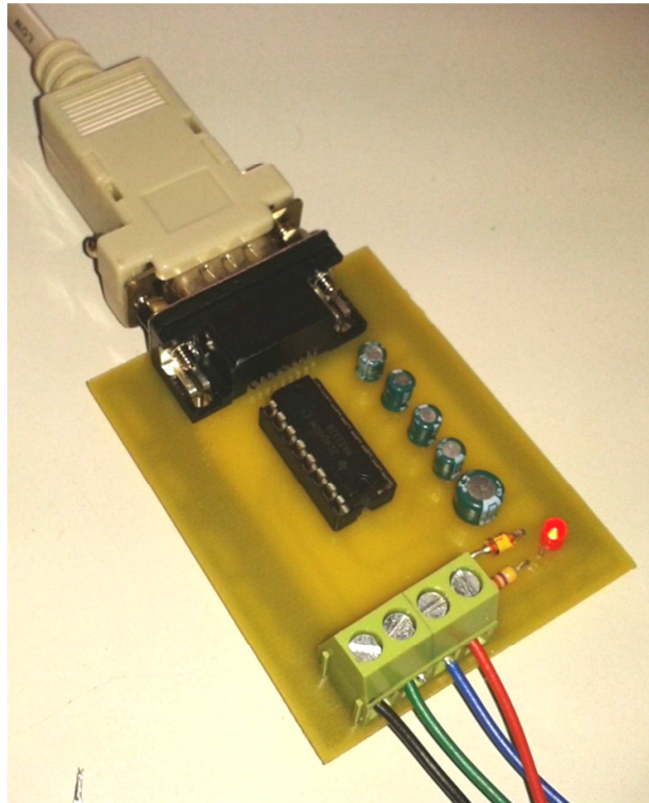


Figura 5.16 – Placa de conversão TTL/RS-232

O desenho da placa de conversão encontra-se disponível no Anexo B. Foi ainda realizada outra placa semelhante com isolamento (2 grounds) recorrendo a um acoplador ótico (Anexo C) [27].

5.3.2 Protótipo da Shield RS-232

Uma vez realizado um conversor de Arduino para RS-232, foi pensada a hipótese de desenvolvimento de um protótipo duma *Shield* com vista a posterior comercialização, dado que não existem soluções para aplicação direta, ou são caros. Para além disso, estes modelos não apresentam entradas nem saída em DB9, o que implica a sua montagem posterior. Assim, foi desenvolvido o esquemático do protótipo, representado na Figura 5.17.

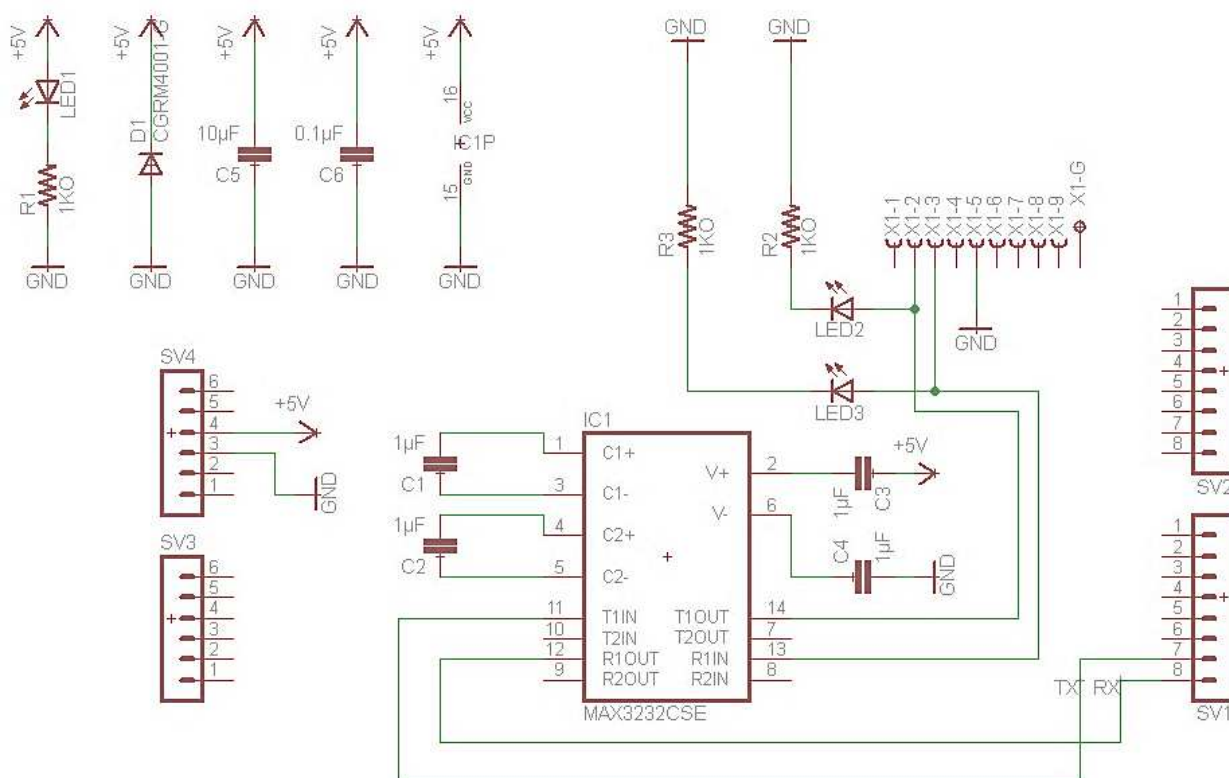
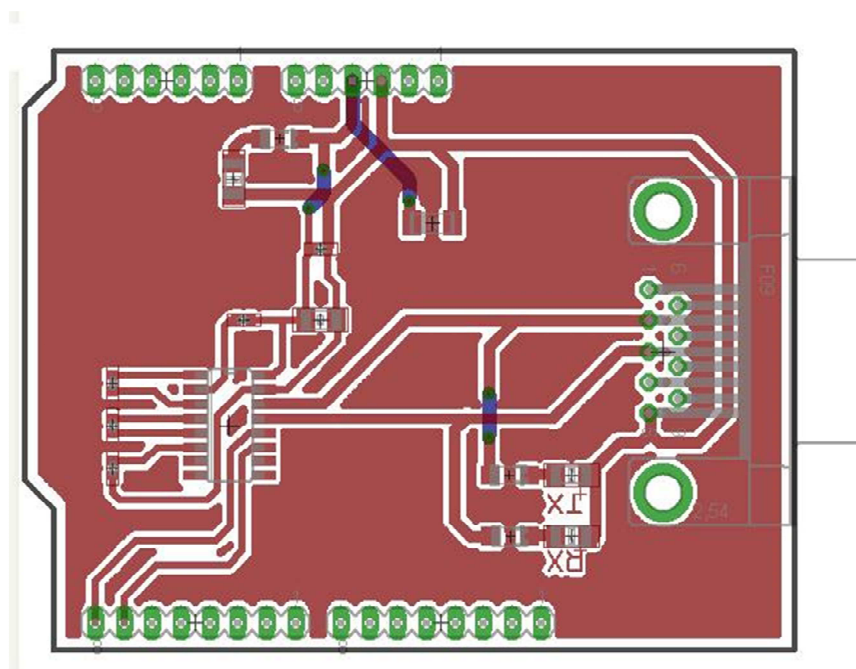


Figura 5.17 – Esquemático da *Shield* RS-232

O aspeto da *Shield* é visível na Figura 5.18.

Figura 5.18 – *Shield* RS-232

Foram utilizados componentes SMD de modo a tornar o design mais compacto. A lista de componentes a utilizar para a montagem da *Shield* encontra-se disponível no Anexo D.

5.3.3 Implementação da HMI Omron NQ3-MQ000-b

A HMI Omron NQ3-MQ000-b (Figura 5.19) apresenta um software dedicado à criação de programas, designado NQ-Designer. O NQ-Designer é um software bastante intuitivo, que permite criar menus, alarmes e ler variáveis provenientes de outros dispositivos com relativa facilidade.



Figura 5.19 – Omron NQ3-MQ000-b

Foi criado um programa no NQ-Designer, no sentido de testar a solução. O programa desenvolvido apresenta alguma complexidade de construção, com alguns menus, campos de introdução de dados, opções de ajuda, várias línguas, FAQ, etc, podendo ser utilizado recorrendo ao ecrã táctil ou às teclas físicas programáveis existentes na HMI.

A Figura 5.20 pretende ilustrar as potencialidades do NQ-Designer e algumas imagens da interface criada:



Figura 5.20 – Interface da HMI Omron

Como é possível visualizar a HMI Omron possui uma boa capacidade gráfica e têm muitas funcionalidades úteis na execução de uma interface gráfica.

Apesar de apresentar uma comunicação direta e de implementação simples com PLC's de diversas marcas, apresenta alguma dificuldade na configuração série, que é a comunicação base do Arduino.

5.3.4 HMI National Instruments TPC-2006

A HMI TPC-2006 (Figura 5.21) é um modelo descontinuado da *National Instruments*, contudo apresenta um elevado potencial para desenvolvimento e visualização de sistemas de monitorização.



Figura 5.21 – HMI National Instruments TPC-2006

Esta HMI é antiga, pelo que tem algumas limitações, nomeadamente:

- falta de drivers para sistemas operativos atuais;
- não permite imagens/animações;
- apresenta uma resolução muito baixa.

No que toca ao desenvolvimento de *software* para implementação na HMI, todo ele será programado através do *LabVIEW*, recorrendo a um *plugin* designado por *touch screen module*, fornecido pela *National Instruments*.

Para tal, deverá ser estabelecida a comunicação da HMI com o PC para efeitos de programação e transferência de dados recorrendo ao *software Microsoft ActiveSync* e *Microsoft Windows Embedded 4.2 CE*.

Existem algumas limitações associadas à transferência de ficheiros e programação da HMI:

- Não é possível delimitar no *LabVIEW* as dimensões e resolução do ecrã da HMI
- Apesar da programação ser feita em *LabVIEW*, uma grande parte dos blocos não é aceite pela HMI, nos quais estão incluídas algumas paletes *VISA*. Estas paletes são o *standard* da comunicação com portas série do *LabVIEW*.
- Algumas das funcionalidades, nomeadamente alarmes, serão mais difíceis de implementar, uma vez que não existem blocos de alarme suportados pela HMI.

Dados estes problemas encontrados, foi realizado o seguinte procedimento de implementação da HMI (Figura 5.22).

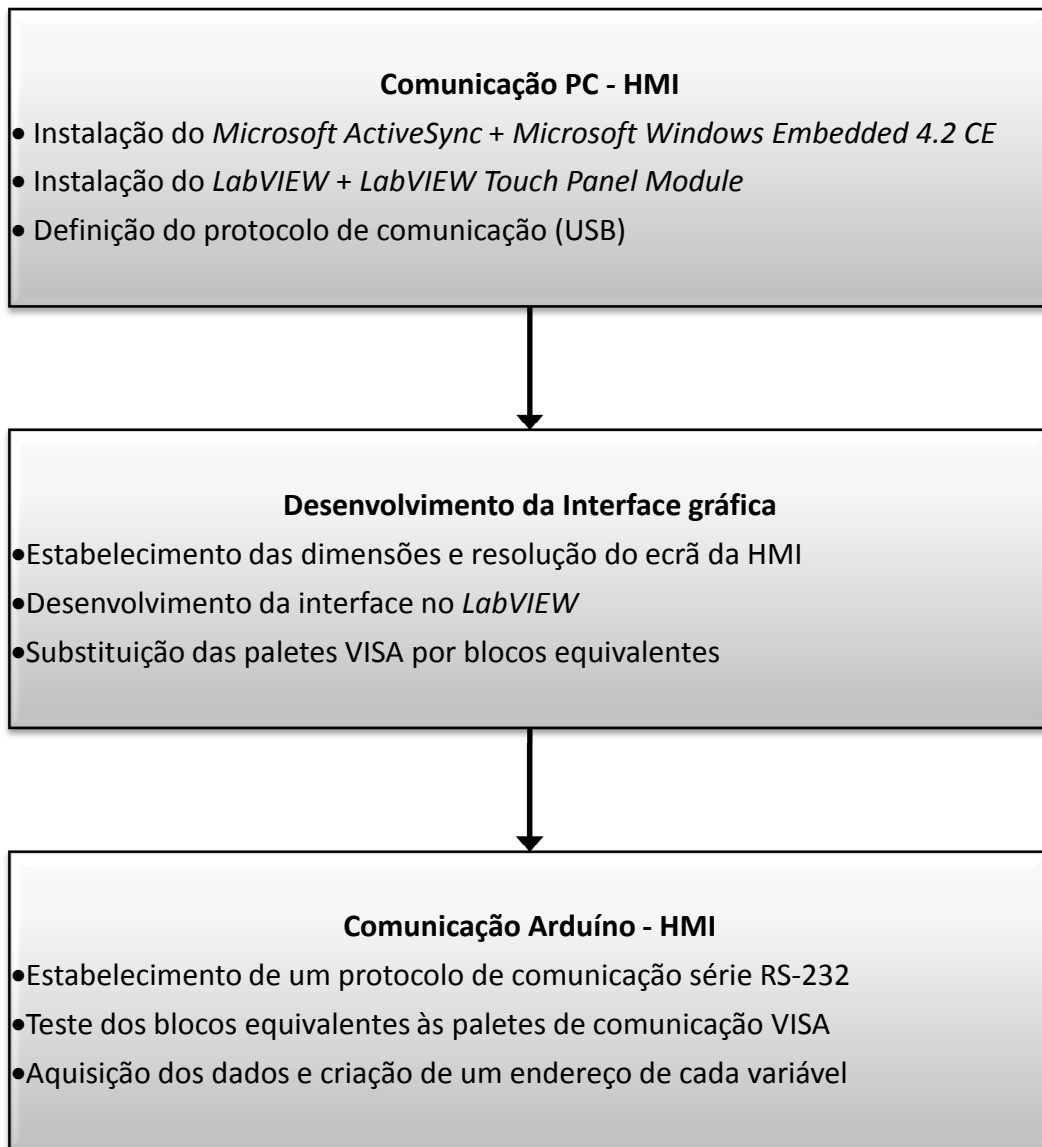


Figura 5.22 – Procedimento de implementação da HMI

A comunicação entre o Arduino e a HMI *National Instruments TPC-2006* foi estabelecida. A interface é mais pobre do que a que existe no computador, uma vez que as funcionalidades disponíveis e a capacidade de processamento da HMI são muito inferiores.

6 Testes e Validação

No sentido de avaliar as opções tomadas e a capacidade dos sensores face ao problema, foram realizados alguns testes e simulações.

6.1 Simulação térmica do espelho

De modo a avaliar o erro entre a temperatura do centro do espelho e a temperatura no local onde o sensor de temperatura está implementado, procedeu-se à análise usando o software SolidWorks 2012. Assim, foi desenvolvido um modelo físico simplificado, no qual foi implementado um modelo térmico dos componentes e das condições fronteira. Desta forma foi possível simular as transferências térmicas, quer no espelho e respetivo suporte, quer no sensor de temperatura de contacto, e tirar conclusões relativamente as diferenças de temperatura previsíveis.

A fonte térmica do modelo é um feixe laser de CO_2 . Considerando uma potência de 3,5 kW, e uma taxa de reflexão de 98,4% (condições ideais para o espelho limpo), a restante energia, isto é, 1,6% é absorvida, representando aproximadamente 100 W [8].

O chiller faz chegar ao permutador do espelho água a 20 °C, que em condições normais de funcionamento sai a aproximadamente 23 °C (valor empírico verificado no chiller). Esta variação térmica no permutador deve-se à troca de calor com o espelho. O coeficiente de convecção no permutador foi considerado de 300 $\text{W/m}^2\text{K}$, uma vez que se trata de uma conduta de água com convecção forçada [28].

Foi ainda considerada a convecção das faces expostas do espelho. O coeficiente utilizado foi de 30 $\text{W/m}^2\text{K}$, considerando a convecção do ar dados os movimentos de vaivém do espelho (Figura 6.1) [28]. A radiação térmica das faces expostas foi também considerada, mas toma valores desprezáveis face aos restantes mecanismos de transferência de calor para as temperaturas em causa. Foi considerada temperatura ambiente de 20 °C.

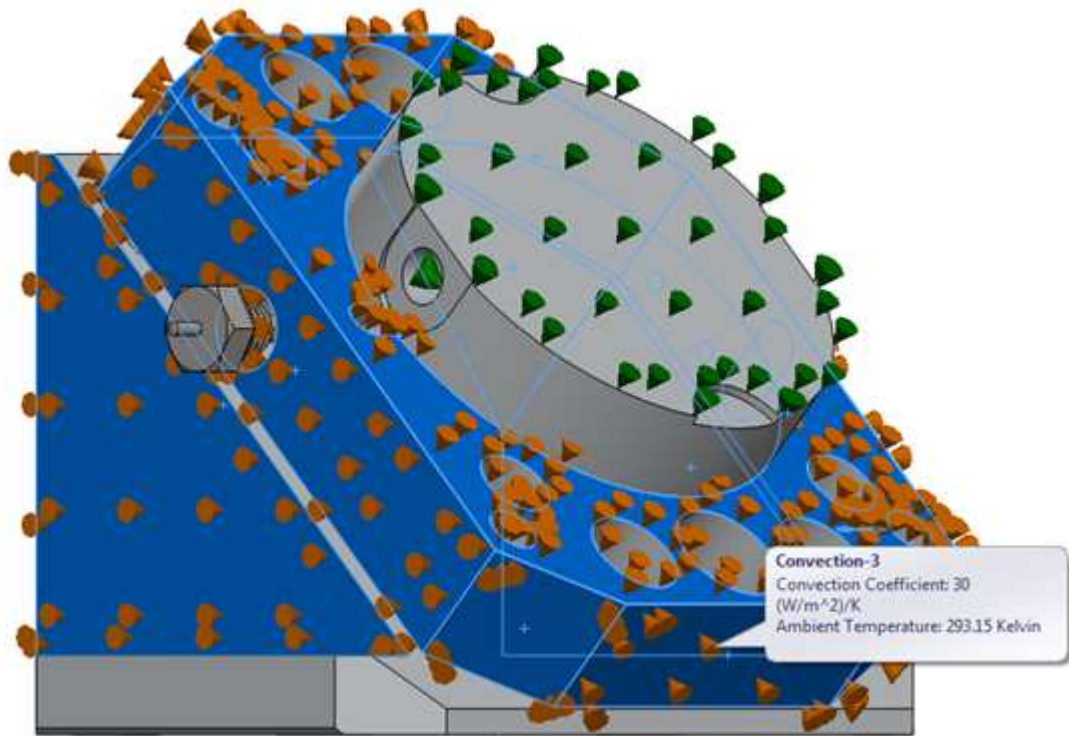


Figura 6.1 – Convecção natural (ar)

Uma vez que os materiais não apresentam folgas na sua montagem, foram desprezadas as resistências térmicas de contacto.

O resultado final da simulação térmica pode ser visualizado na Figura 6.2.

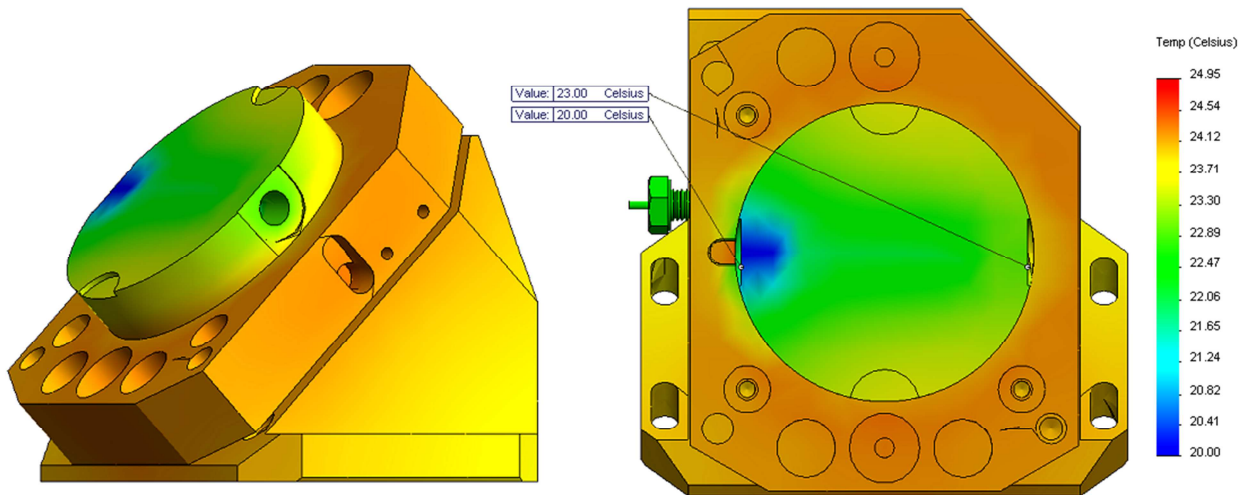


Figura 6.2 – Resultados do modelo térmico

Foi incluída a montagem do sensor de temperatura de contacto. Na montagem foi desprezada a condutividade térmica do casquilho, sendo apenas considerado o contacto entre o espelho e o sensor de temperatura. A temperatura obtida pode ser verificada na Figura 6.3.

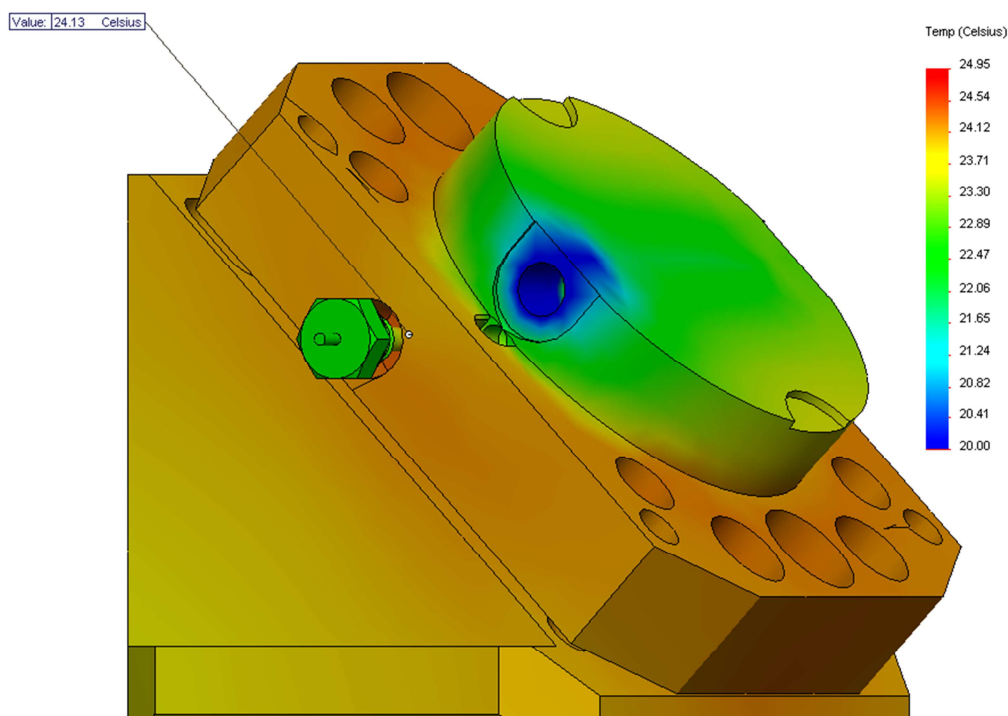


Figura 6.3 – Simulação térmica do permutador

Como é possível aferir, a temperatura do termistor na simulação é de 24,13 °C enquanto a temperatura no espelho é de 24,95 °C. Esta diferença de temperatura deve-se essencialmente à dissipação de calor por convecção e pelo arrefecimento provocado pelo permutador. Para além disso, é possível verificar que a temperatura no espelho não é homogênea, Figura 6.4.

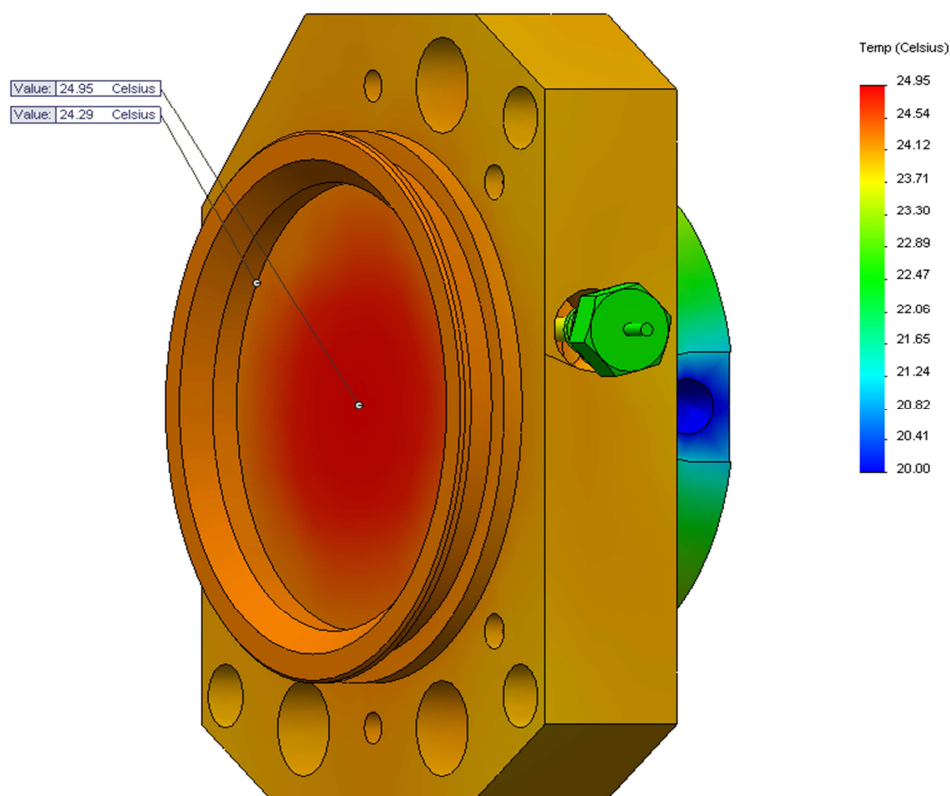


Figura 6.4 – Diferença de temperatura no espelho

A diferença de temperatura entre o termistor e o centro do espelho poderá ser minimizada, recorrendo a um dos seguintes métodos:

- colocação do sensor na face do espelho, o que não será interessante;
- colocação do sensor mais afastado dos canais de arrefecimento (eventualmente no topo superior do espelho).

Por outro lado esta diferença poderá não ser muito relevante. Para além disso, este erro pode ser compensada por software.

Posteriormente, aquando da implementação, e caso se entenda que este erro é relevante, deveriam ser determinadas rigorosamente as temperaturas para várias condições de funcionamento da máquina, recorrendo a uma simulação térmica com maior detalhe, ou a testes de laboratório.

Os testes poderiam ainda ser realizados na máquina durante o processo de corte, com auxílio de uma câmara termográfica. Poderá ser utilizado em alternativa um pirómetro, que poderá operar com a máquina em funcionamento desde que não se verifiquem interferências.

6.2 Teste de alcance do detetor de barreira

De modo a poder-se utilizar o detetor de fumo, será importante garantir que em condições normais é possível alcançar a gama de trabalho da máquina, de cerca de 3 metros.

Noutras máquinas de maior envergadura, o comprimento da mesa poderá ser de 7 metros, pelo que seria relevante realizar o teste para essa distância, garantindo que segundo este critério este sensor poderá ser aplicado a todas as versões das máquinas da ADIRA.

Na Figura 6.5 é possível visualizar um dos testes realizados para determinação do alcance do detetor. Os restantes testes foram realizados de forma análoga, recorrendo a barras de 3 e 7 metros.

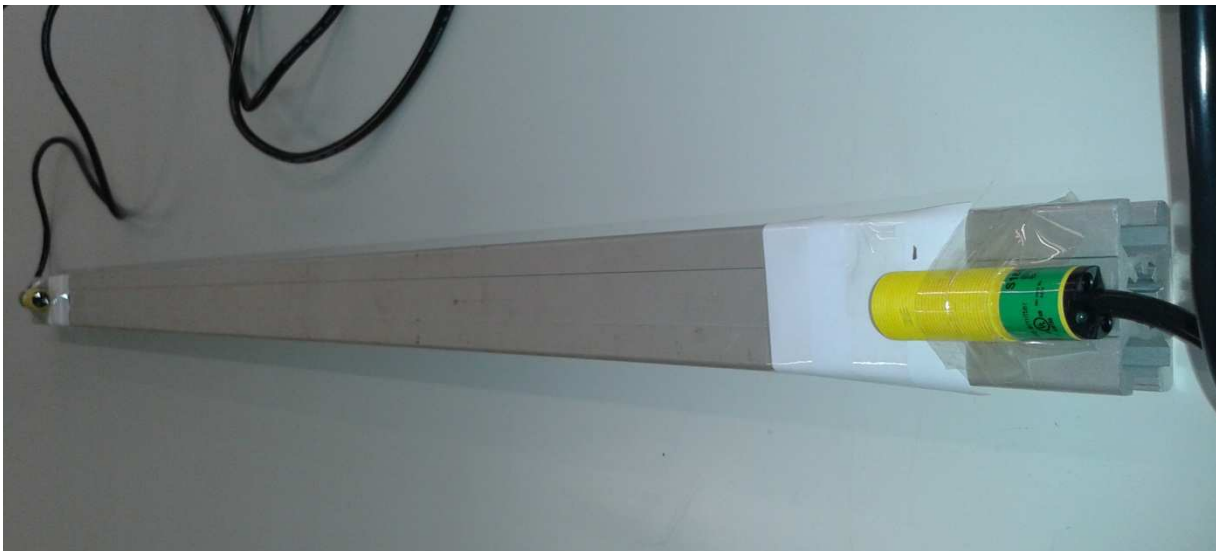


Figura 6.5 – Teste de alcance (1m)

Uma vez que o sensor apresenta uma baixa sensibilidade a objetos não opacos poderá ser necessário proceder a uma diminuição da tensão de alimentação. Esta diminuição refletir-se-á numa diminuição da intensidade luminosa do emissor.

Esta redução da tensão de alimentação poderá ser realizada caso se verifique que o recetor quando alimentado a uma tensão de 24 V se mantenha ativo mesmo na presença de fumo. Alimentando a 12 V a intensidade da radiação emitida será menor, pelo que a sensibilidade ao fumo será maior.

Verificou-se que mesmo para a maior distância, 7 metros, e para a alimentação de 12 V o detetor funciona como previsto.

6.3 Teste de deteção de fumo/barreira

No sentido de validar a seleção do detetor de fumo, seria interessante verificar a aplicabilidade do mesmo.

A empresa forneceu um fole semelhante aos que se encontram equipados nas máquinas, pelo que foi possível simular em laboratório alguns deslocamentos e a queima do fole.

Foram realizados dois testes:

- simulação da queda/desvio do fole;
- simulação da queima do fole.

6.3.1 Simulação da queda/desvio do fole

Foi testada a hipótese de desvio e queda do fole, para distâncias de 1, 2 e 3 metros.

Foram obtidos resultados satisfatórios, onde foi possível verificar que a receção deixava de ocorrer logo após o desalinhamento do emissor e recetor. Desta forma é possível garantir a deteção da barreira.

Contudo foi também possível verificar que apenas quando o emissor deixa de ver o recetor é que se dá o corte de sinal. Para pequenos ângulos de desvio do emissor, o sinal emitido continua a ser recebido pelo recetor.

6.3.2 Simulação da queima do fole

As condições utilizadas para o teste foram semelhantes às condições previstas de avaria da máquina. Assim:

- o fole encontra-se suspenso por duas calhas, entre dois pontos fixos;
- o emissor e detetor foram alinhados, sendo ambos fixados numa barra de metal que foi colocada ao longo do fole;
- a tensão de alimentação utilizada foi de 24 V;
- foi gerado fumo, queimando em simultâneo duas zonas próximas do fole, situadas a meio vão;
- os sensores estavam colocados a 2 metros de distância.

Na Figura 6.6 é possível visualizar a montagem realizada para o teste.



Figura 6.6 – Montagem utilizada para o teste do fole

Como é possível verificar na Figura 6.7, o fole libertou muito fumo e praticamente não apresentou danos visíveis na sua estrutura, comprovando as previsões apontadas no capítulo 2.



Figura 6.7 – Fumo gerado pela queima do fole

Verificou-se que o fumo foi suficiente para cortar a transmissão de sinal.

Apesar da geração de fumo ter sido suficiente para cortar a receção do infravermelho, não foi uma deteção constante e prolongada, apresentando alguma intermitência e oscilação em alguns momentos, nomeadamente quando o fumo saía por alguns orifícios do fole.

Contudo os resultados conseguidos foram satisfatórios, comprovando a capacidade do detetor infravermelho em detetar fumo. Foi possível comprovar experimentalmente que o fole é de um material ignífugo e auto extingüível, que entra em combustão sem chama, não criando grandes danos à estrutura mas gerando muito fumo.

Esta constatação para além de ser muito interessante no âmbito do sensor implementado, permite abrir novas portas para outro tipo de estudos e testes.

6.3.3 *Análise termográfica da queima do fole*

No seguimento do anterior teste e de modo a avaliar o comportamento do sensor na presença de fumo, decidiu-se analisar a condução térmica ao longo do fole e a dissipação do fumo recorrendo a uma camara termográfica. Esta análise pode ter interesse na medida em que permite saber se existe concentração de fumo e calor no interior do fole ou se este se dissipa rapidamente. Na Figura 6.8 é possível visualizar a estrutura de teste para análise termográfica.



Figura 6.8 – Estrutura de teste para análise termográfica

O setup utilizado contempla um computador portátil, uma camara termográfica (FLIR A325), duas camaras fotográficas (SONY dsc-w350), um detetor de infravermelhos (Banner S186E e Banner S18SP6R), uma fonte de alimentação (24 V) e o fole com a respetiva estrutura (Figura 6.9).

Figura 6.9 – *Setup* utilizado

Procedeu-se à queima do fole, e mais uma vez houve deteção por parte do sensor. O processo de queima do fole foi registado, como é possível visualizar na Figura 6.10.

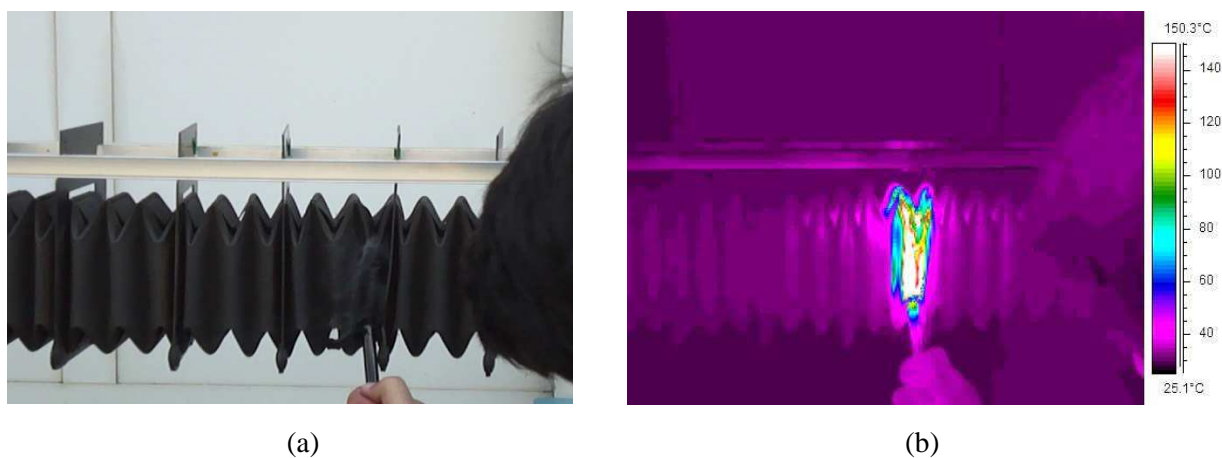


Figura 6.10 – Queima do fole (a); em perspectiva termográfica (b)

Embora o detetor tenha detetado fumo, não foi possível verificar a propagação térmica do mesmo através da camara termográfica. Ocorreram apenas pequenas oscilações de temperatura devido à propagação do calor (ver Figura 6.11).

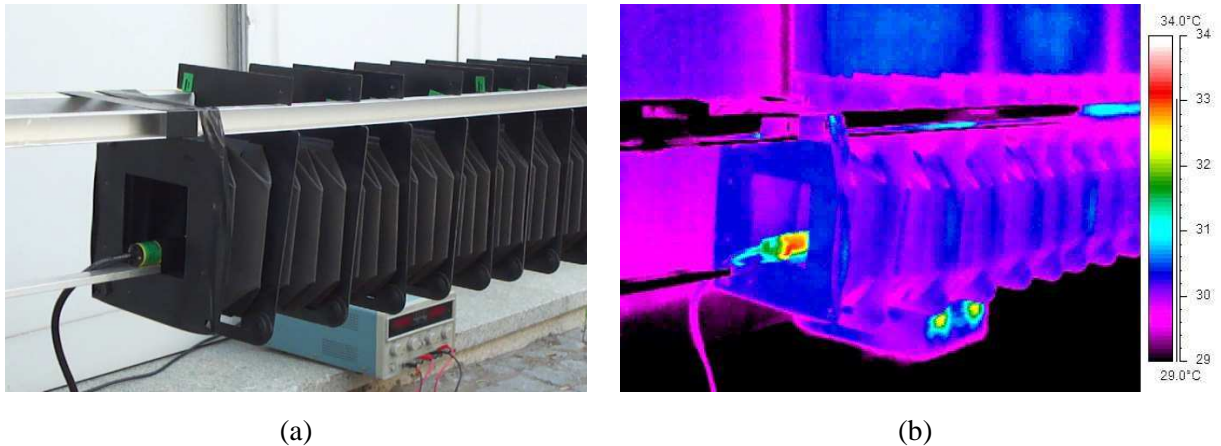


Figura 6.11 – Detetor durante a queima (a); em perspectiva termográfica (b)

Ao longo do teste foi possível retirar algumas conclusões:

- a condução térmica ao longo do fole é muito baixa;
- a dissipação térmica dá-se sobretudo sob a forma de convecção e radiação;
- o fumo gerado não é detetado pela camera termográfica (não apresenta uma temperatura elevada, não deixando rasto térmico).

Esta análise permite ainda concluir que o fole é impermeável a fumo e que numa situação real o fumo gerado ficará dentro do fole. Foi ainda possível consolidar a ideia de que o detetor é adequado para esta aplicação.

6.3.4 Proposta de solução alternativa para deteção de fumo

Apesar dos resultados satisfatórios, o tempo necessário para a deteção do fumo foi elevado. Evidentemente que numa situação real a geração de fumo será mais rápida que a simulada em laboratório, tendo em conta a fonte térmica. Contudo, pretende-se uma deteção mais rápida do fumo. Foram então procuradas soluções alternativas à solução implementada.

Segundo Chen [29], existem meios mais eficazes de deteção de fumo, nomeadamente de CO_2 e CO. Chen, que estudou a deteção de fumo em aviões, especificamente nos compartimentos de carga, concluiu que o problema da deteção de fumo não reside na sua deteção, mas sim no prejuízo provocado pelos falsos alarmes, que representam mais de 99% dos casos. No caso por ele estudado, cada falso alarme em média representa prejuízos entre \$30,000 a \$50,000 [30].

Analogamente, num processo industrial, também existem custos associados à paragem de uma máquina. Neste sentido, deverá ser proposta uma solução alternativa aos detetores existentes, que garanta uma deteção rápida e eficaz do fumo.

A proposta de solução alternativa baseia-se na proposta implementada por Chen, e visa a criação de uma pequena caixa internamente espelhada. A caixa deverá possuir um orifício de entrada para um díodo laser e um orifício de saída para um detetor laser.

A caixa deverá estar situada numa conduta de ar ligada ao caminho ótico. Desta forma, o ar que circula no caminho ótico circularia pela caixa, como é possível visualizar na Figura 6.12.

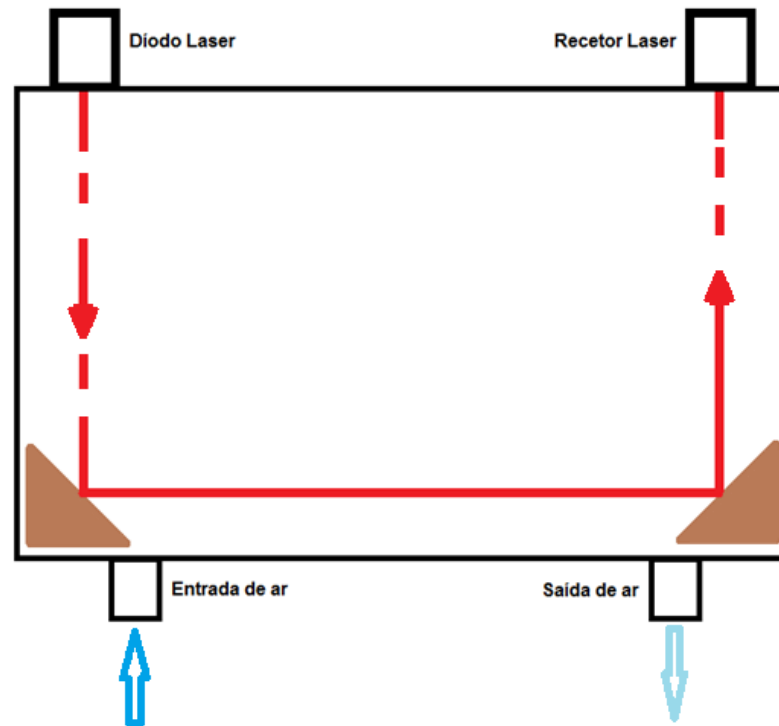


Figura 6.12 – Esquema da caixa refletora

Para que o funcionamento deste sistema seja conseguido, será necessário implementar um sistema de ventilação forçada. Para além disso a caixa deverá estar numa posição superior ao fole, uma vez que o ar quente tem tendência natural para subir. Esta caixa poderá apresentar dimensões muito pequenas e estar situada no *bypass*, onde não há movimento de componentes. Poderá mesmo ser intercalada numa tubagem. Dada a ventilação forçada, o fumo propagar-se-á pela caixa e o recetor deixará de receber sinal, detetando o fumo.

O número de refletores não deverá ser muito elevado, sob pena de dificultar a calibração do dispositivo e gerar com grande frequência falsos alarmes devido a desvios na reflexão.

7 Conclusões

Como foi possível constatar ao longo desta dissertação, existem problemas associados à falta de monitorização do caminho ótico da máquina de corte por laser em estudo. A sensorização do caminho ótico é a melhor via para aumentar a segurança da máquina, detetando condições impróprias de funcionamento. Desta forma é possível minimizar a probabilidade de ocorrerem danos na máquina.

A sensorização adotada apresentou resultados satisfatórios, cumprindo os requisitos, apesar do seu baixo custo:

- não foi ultrapassada o orçamento definido;
- permitiu a leitura dos parâmetros mais relevantes;
- a sensorização é aplicável a todas as gamas de máquinas de corte por laser ADIRA;
- a solução é modular e não implica alterações na estrutura da máquina;
- a solução apresenta um acréscimo real de segurança do produto final.

A proposta de solução *low cost* foi desenvolvida pensando na maximização da robustez e fiabilidade sem ultrapassar o orçamento previsto. Em nenhuma circunstância poderá ser garantida uma total fiabilidade de um qualquer sensor, contudo será possível através de um maior investimento adquirir sensorização equivalente com níveis de confiança e segurança superiores.

A disposição física dos sensores contemplada na proposta de solução apresenta resultados muito positivos, permitindo uma maximização das potencialidades da sensorização do caminho ótico sem comprometer o funcionamento da máquina.

A programação do microcontrolador para leitura dos valores provenientes da sensorização mostrou-se muito útil na medida em que permitiu a realização de testes e simulação das condições de funcionamento da máquina. Contudo este dispositivo não deverá ser incluído numa proposta de implementação final na máquina, porque não apresenta robustez e fiabilidade para utilização em ambiente industrial.

As interfaces criadas em *LabVIEW*, tanto para o computador como para a HMI, não só ilustram as capacidades da monitorização como apresentam também um elevado potencial para o desenvolvimento posterior de uma interface na máquina, tendo como base a interface proposta.

As simulações de queda e queima do fole permitiram verificar em ambiente laboratorial o funcionamento da solução proposta para deteção do fumo. A análise termográfica permitiu concluir a baixa condutividade térmica do fole e verificar a dissipação do calor sob a forma de convecção e radiação. Permite ainda verificar a impermeabilidade do fole a fumo.

O modelo térmico do espelho nas condições ideais de funcionamento permite ter uma aproximação da temperatura no centro do espelho e na periferia. Uma vez que as temperaturas são diferentes, é possível concluir que a leitura da temperatura na periferia do espelho acarreta um erro que, dada a sua magnitude nas condições ideais de funcionamento, pode ser desprezado.

Sugestão para trabalhos futuros

No sentido de continuar o trabalho realizado, deverá ser desenvolvida uma nova estratégia de abordagem do problema. Seria essencial ter um orçamento maior para garantir a aquisição de um conjunto de sensores e PLC que tenham a fiabilidade necessária.

Existem aspetos a desenvolver para que seja possível a implementação da proposta de solução *low cost* na máquina, nomeadamente:

- **substituição do Arduíno por um PLC:** o Arduíno não se encontra preparado para funcionar em ambiente industrial;
- **alteração da comunicação:** a comunicação entre os elementos constituintes do sistema de sensorização deverá ser realizada num protocolo de comunicação balanceado, nomeadamente RS-485 ou RS-422. Estes protocolos são menos susceptíveis a ruídos eletromagnéticos, apresentando resultados satisfatórios em ambiente industrial. Para além disso, ambos os protocolos permitem a criação de um barramento, reduzindo a cablagem utilizada;
- inclusão de **transmissores de corrente** para uma maior imunidade ao ruído electromagnético.

No sentido de investir na inovação e desenvolvimento produtos, seria interessante:

- testar e avaliar as propostas alternativas para deteção do fumo, nomeadamente das propostas sugeridas (fibra ótica e caixa espelhada);
- estudar a possibilidade de implementação de um detetor de CO₂/CO.

8 Referências e Bibliografia

1. Milonni, P.W. and J.H. Eberly, *Laser Physics*, ed. Wiley. 2010: A John Wiley & SONS, INC. 850.
2. Steen, W.M. and J. Mazumder, *Laser Material Processing*. 4th ed. 2010: Springer.
3. Injeyan, H. and G.D. Goodno, *High-Power Laser Handbook*. 2011: McGraw-Hill.
4. DeMaria, A.J. and J. Thomas V. Hennessey, *The CO2 Laser: The Workhorse of the Laser Material Processing Industry*. SPIE Professional Magazine, 2010: p. 27.
5. Adira, *Manual de Instruções - Centro de Corte Laser Tipo LP*. 2012.
6. Macro, R.L., *Rofin DC Series*. 2013. p. 6.
7. Eggleston, J.M., et al., *The slab geometry laser - part I: theory*. IEEE J. Quantum Electron., 1984: p. 289.
8. II-IVinfrared. *Standard Mirror Coatings*. 2013 [cited 2013 10/07].
9. II-IVinfrared. *Absorption in Laser Optics*. 2013 [cited 2013 10/07].
10. Arnold, A. *Bellows materials*. 2013 [cited 2013 24/07].
11. Key, B., *Heat Recovery from chilled water systems - Applications for Heat reclaim chillers*, Carrier, Editor. 2008. p. 19.
12. II-IVinfrared. *Absorption Effects in CO2 Lasers*. 2013 [cited 2013 10/07].
13. Wood, L.A., *The Use of Dew-Point Temperature in Humidity Calculations*. Research of the National Bureau of Standards - C. Engineering and Instrumentation, 1970.
14. Aire, R., *Psychrometric Chart*. 2009.
15. Webster, J.G., *Measurement, Instrumentation, and Sensors - Handbook*. 1999: CRC PRESS.
16. Restivo, M.T., et al., *Laboratórios de Instrumentação para Medição*, ed. E.d.U.d. Porto. 2008.
17. Jumo, *DataSheet 902815*. 2011. p. 7.
18. Vaisala, *DMT152 Dewpoint Transmitter for Low Dewpoint Measurement in OEM applications*. 2013. p. 2.
19. Gavazzi, C., *Photoelectrics Through-beam Type PA18C.T...*, DC. 2011. p. 6.
20. Boxall, J., *Arduino Workshop*, ed. N.S. Press. 2013: William Pollock.
21. Arduino, *Serial Library*. 2008.
22. ThermoMart. *NTC Sensores 10kΩ Thermistor*. 2013 [cited 2013 05/05].
23. Sensirion, *Datasheet SHT1x*, S.-T.s. company, Editor. 2010. p. 11.
24. Banner, E., *Compact Sensors*. 2013. p. 92,93.
25. Steinhart, J.S. and S.R. Hart, *Calibration curves for thermistors*. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1968. **15**(4): p. 497-503.

26. Instruments, T., *MAX232 Datasheet*, T.I. Incorporated, Editor. 2002. p. 7.
27. Khan, M.A. *ISOLATED FULL DUPLEX RS232C INTERFACE*. 2000 11/07/2013]; Available from: http://chaokhun.kmitl.ac.th/~kswichit/Rs232_web/Rs232.html.
28. 2011, S. *Online help - Convection Heat Coefficient*. 2011 13/08/2013]; Available from: http://help.solidworks.com/2011/english/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Performing_Thermal_Analysis.htm.
29. Chen, S.-J., et al., *Fire detection using smoke and gas sensors*. Fire Safety Journal, 2007(8): p. 507-515.
30. Blake, D., *Aircraft Cargo Compartment Smoke Detector Alarm Incidents on U.S.-Registered Aircraft, 1974-1999*. DOT/FAA/AR-TN00/29, 2000.

ANEXOS

ANEXO A

- *Placa* de interface

ANEXO B

- Conversor TTL/RS-232

ANEXO C

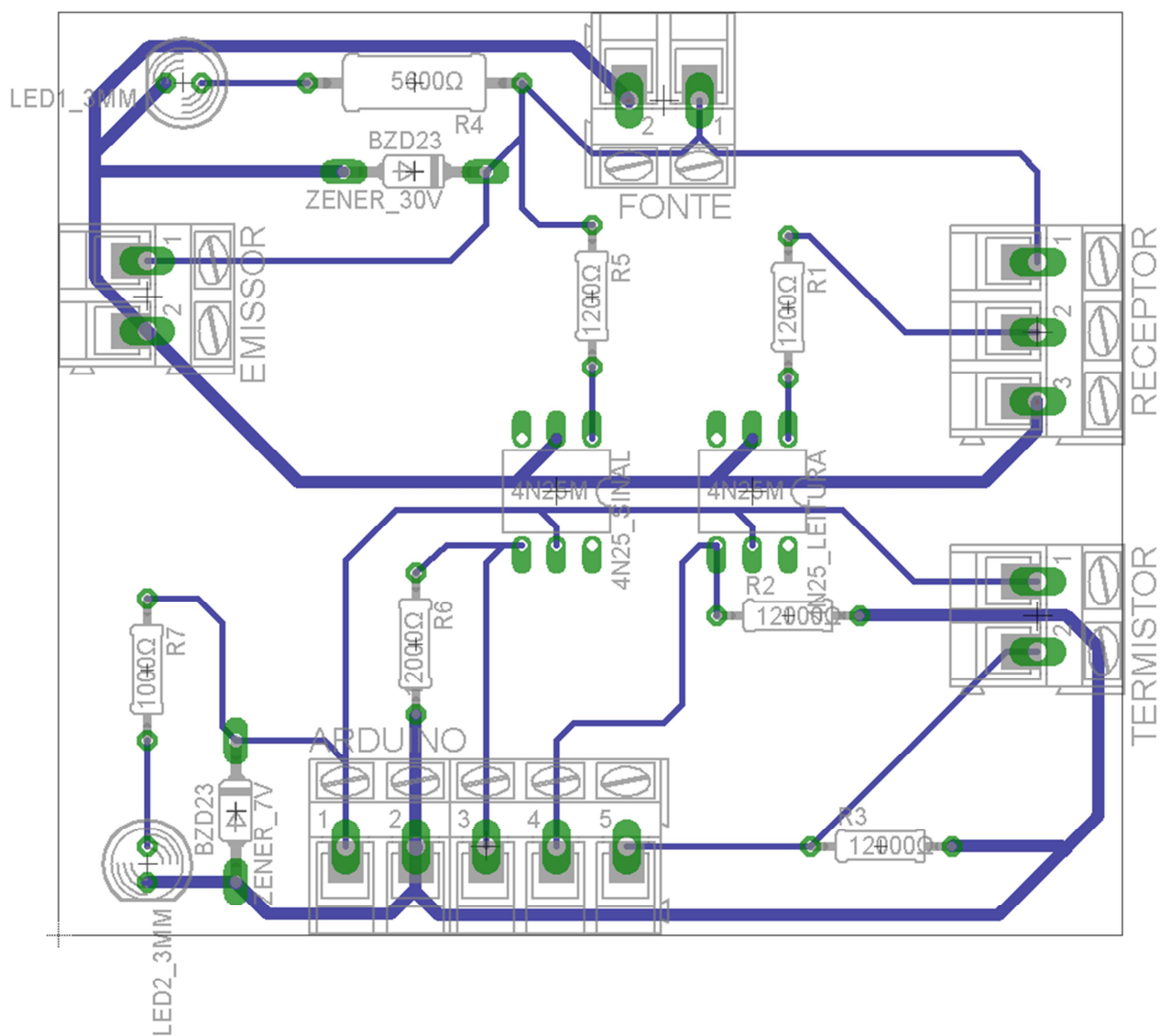
- Conversor TTL/RS-232 com isolamento

ANEXO D

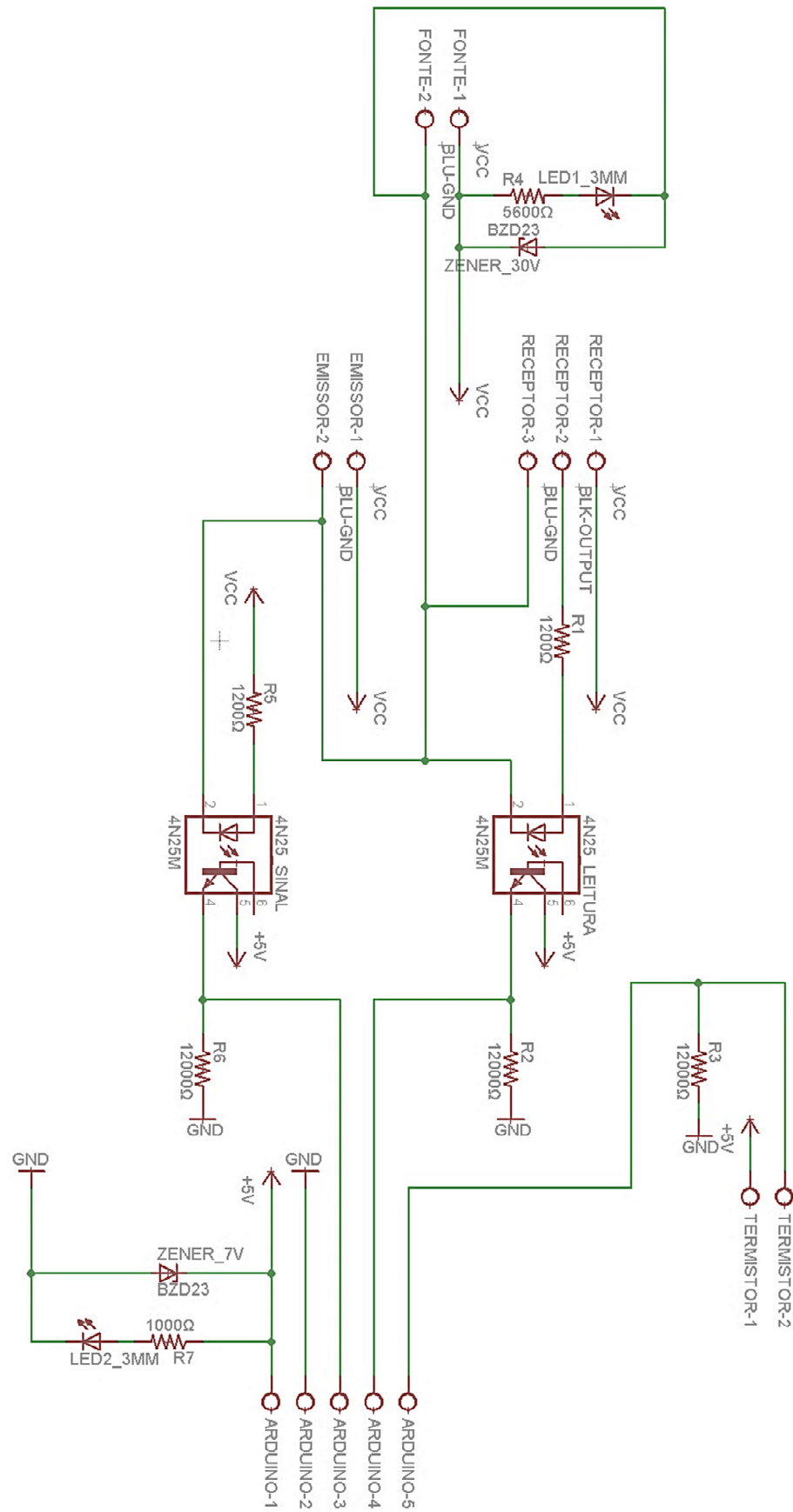
- Lista de componentes utilizados na *Shield* RS-232

ANEXO A: Placa de interface

Placa

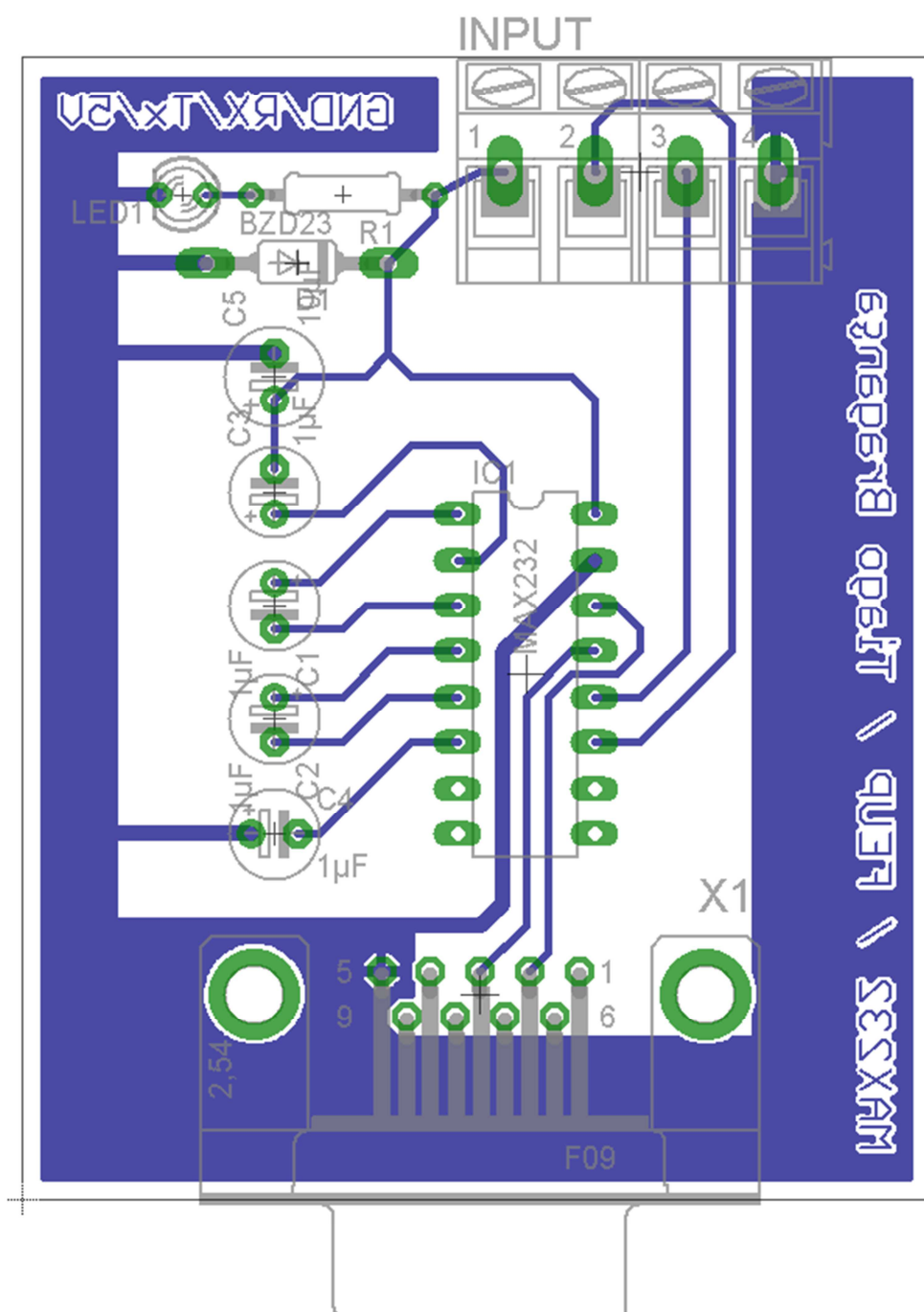


Esquemático

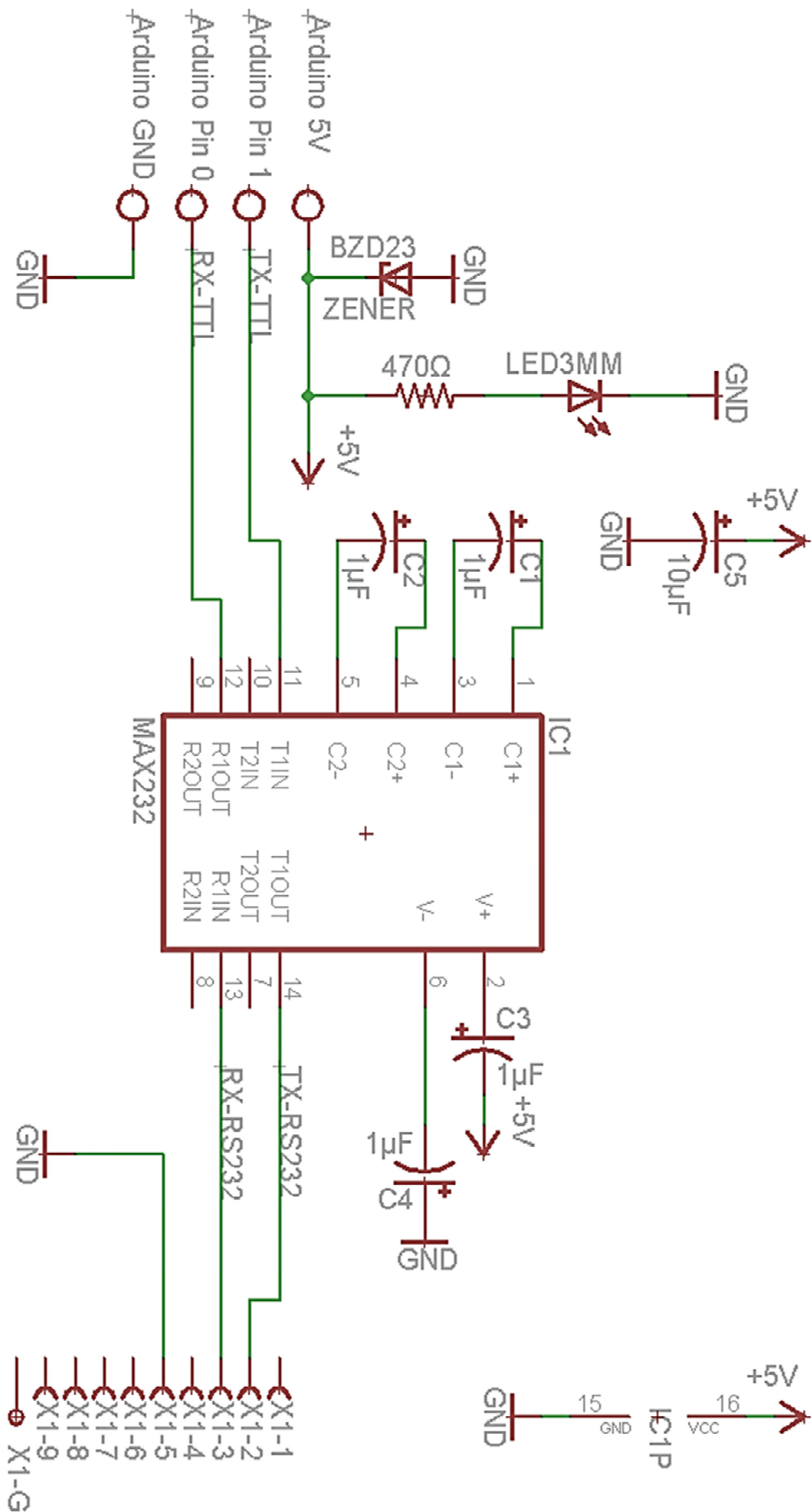


ANEXO B: Conversor TTL/RS-232

Placa

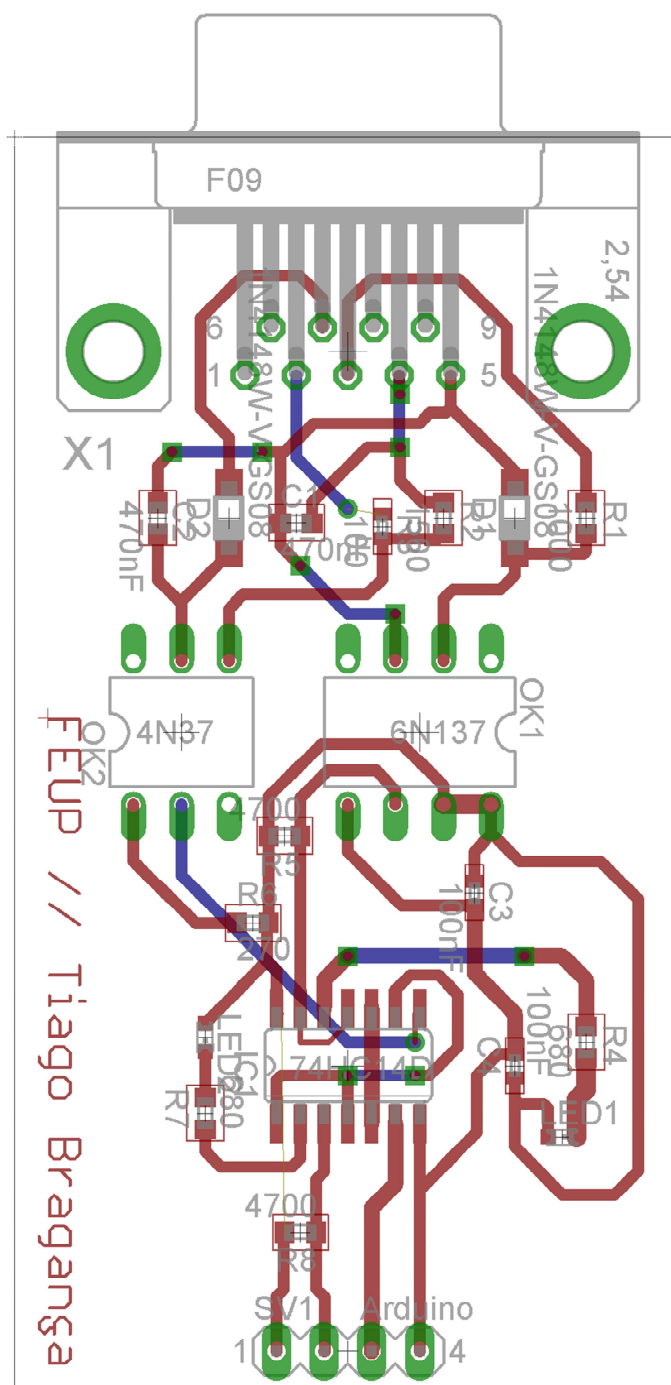


Esquemático

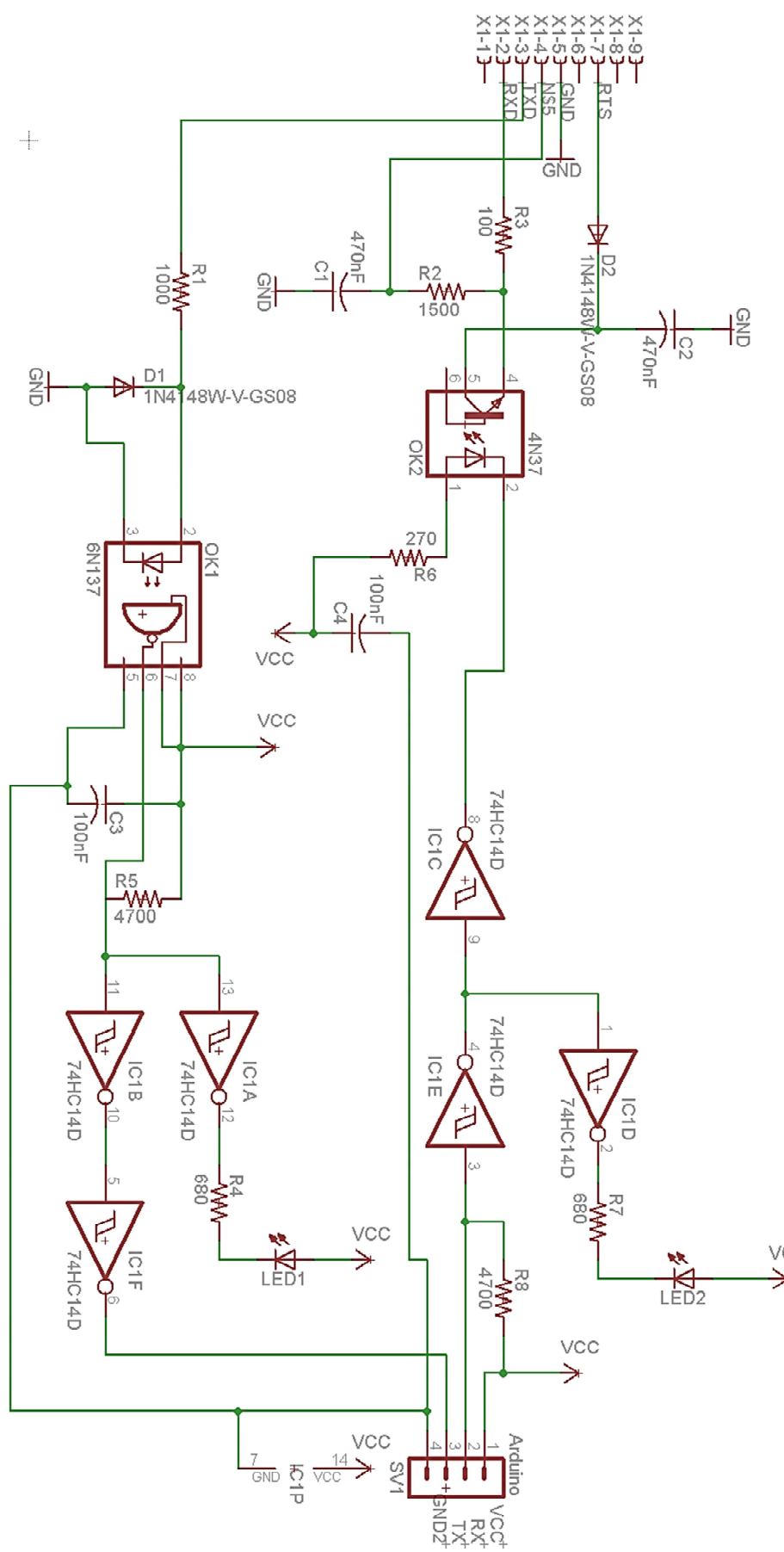


ANEXO C: Conversor TTL/RS-232 com isolamento

Placa



Esquemático



ANEXO D: Lista de componentes utilizados na *Shield* RS-232

Condensadores				
Designação	Caixa	Capacitância	Tensão	Tolerância
TDK - C3216X7R1C106K160AC - Condensador	1206	10UF	16 V	+/-10%
TDK - C1005X5R1C105K050BC - Condensador	0402	1UF	16 V	+/-10%
TDK - CGA2B1X7R1C104K050BC - Condensador	0402	0.1UF	16 V	+/-10%

Leds			
Designação	Caixa	Cor	FV
WURTH ELEKTRONIK - 150120VS75000 - GREEN	1206	Verde	2 V
WURTH ELEKTRONIK - 150120RS75000 - RED	1206	Vermelho	2 V

Resistências				
Designação	Caixa	Resistência	Potência	Tolerância
VISHAY DALE - CRCW12061K00FKEAHP	1206	1KOHM	250mW	1%

Diodo Zener			
Designação	Caixa	Tensão	Potência
DIODES INC. - BZT52C7V5-7-F	SOD123	7.5 V	500mW

Integrado	
Designação	
MAX3232CSE	